

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy - 342

Jízdní odpor nákladních vlaků

Driving Resistance of Freight Trains

Student: Bc. Tomáš Růžička

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaromír Široký, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Růžička**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 10 Kolejová doprava
Téma: **Jízdní odpor nákladních vlaků**
Driving Resistance of Freight Trains

Zásady pro vypracování:

1. Energetická náročnost nákladní dopravy.
2. Jízdní odpory nákladních vlaků – odpor valení, aerodynamický odpor.
3. Analýza proudění vzduchu kolem železničních vozidel.
4. Návrh modelu aerodynamického působení na železniční vozidlo.
5. Modelování a posouzení vlivu tvaru, řazení a naložení nákladních vozů na aerodynamické vlastnosti vlaku.
6. Provozně technické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- DRÁBKOVÁ, Sylva a kol.: Mechanika tekutin. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2007, 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4.
- JANALÍK, Jaroslav: Obtékání a odpor těles. 1. Vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava. 2008, 108 s. ISBN 978-80-248-1911-2
- KOZUBKOVÁ, Milada: Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX. 1. Vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 153 s. Učební text
- HELLER P., DOSTÁL J.: Kolejová vozidla II. Plzeň: ZUČ v Plzni. 2009.
- KALINČÁK D.: Dopravný prostriedok: výpočtové metody. Žilina: EDIS – vydavateľstvo Žilinskej univerzity. 2005
- KALINČÁK D. GRENČÍK J.: Dopravné systémy. Žilina: EDIS – vydavateľstvo Žilinskej univerzity. 2006

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaromír Široký, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomovou práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomovou práce.
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o veřejných školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu :

Ivana Sekaniny 1796, Ostrava-Poruba, 708 00, Ostrava-Město

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

RŮŽIČKA, T. *Jízdní odpor nákladních vlaků*. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2015, 76 s. Diplomová práce, vedoucí: Šíroký, J.

V této práci jsou simulovány úlohy v oblasti aerodynamického proudění okolo vlakových souprav, výsledky těchto simulací jsou porovnávány, jsou navržena řešení pro snížení aerodynamického odporu a upraveny stávající vztahy pro výpočet vozidlových odporů. Úvodní část práce je zaměřena na porovnání jednotlivých druhů dopravy, jejich výhody, nevýhody a jejich energetickou náročnost. Dále je popsána teorie pohybu vlaku, jednotlivé složky rovnice vlaku a podrobněji jsou rozvedeny vozidlové odpory. Součástí teorie je definice valivého a aerodynamického odporu vlaku. Následně je rozvedena teorie obtékání těles, metody měření a modelování aerodynamického působení na železniční vozidla a v další fázi jsou navrženy modely jednotlivých simulací a jejich vyhodnocení.

ANNOTATION MASTERS THESIS

RŮŽIČKA, T. *Driving Resistance of Freight Trains*. Ostrava: Institute of Transportation, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, 2015, 76 pages. Master's Thesis, supervised by: Šíroký, J.

In this thesis are simulated cases of an airflow around train. Simulation results are compared. Based on this comparison are proposed solutions for air drag reduction and modified current formulas for train driving resistance calculation. Introductory part of thesis is focused on comparison of different kind of transport and their advantages, disadvantages and energy consumption. In next step thesis is focused on train movement theory, especially on driving resistance with air drag and rolling resistance definition. Then is described airflow theory, measure and model making methods to find out airflow influence on train's air drag. In practical part is proposed each simulation model and processed simulations results.

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jaromíru Širokému, Ph.D.
a Ing. Pavlu Dreslerovi za ochotu při odborných konzultacích.

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam použitého značení | 8 |
| 1 Úvod..... | 9 |
| 2 Energetická náročnost nákladní dopravy | 10 |
| 3 Jízdní odpory vlaku | 17 |
| 3.1 Teorie pohybu kolejových vozidel..... | 17 |
| 3.2 Odpor valení..... | 23 |
| 3.3 Aerodynamický odpor..... | 26 |
| 4 Analýza obtékání vzduchu kolem železničních vozidel | 30 |
| 4.1 Teorie obtékání a odporu těles | 30 |
| 4.2 Působení bočního větru na železniční vozidla | 36 |
| 5 Návrh modelu aerodynamického působení na železniční vozidla | 38 |
| 5.1 Modelování v aerodynamických tunelech | 38 |
| 5.2 Matematické modelování, popis CFD software..... | 40 |
| 5.3 Validace simulace, návrh modelu a testovaných souprav..... | 42 |
| 6 Modelování a posouzení vlivu tvaru, řazení a naložení nákladních vozů na aerodynamické vlastnosti vlaku | 46 |
| 6.1 Soupravy s vozy Falls | 46 |
| 6.2 Soupravy s vozy Eas | 50 |
| 6.3 Souprava s vozy Zacens | 52 |
| 6.4 Souprava s vozy Sggrss..... | 54 |
| 6.5 Směsná souprava..... | 59 |
| 6.6 Shrnutí..... | 63 |
| 7 Provozně technické hodnocení..... | 64 |
| 7.1 Úprava výpočtu vozidlového odporu | 64 |
| 7.2 Porovnání trakční práce a porovnání metod výpočtu vozidlového odporu..... | 66 |
| 8 Závěr | 73 |
| Seznam použitých pramenů..... | 74 |
| Seznam obrázků | 75 |
| Seznam tabulek..... | 77 |
| Seznam příloh..... | 78 |
| Příloha 1: Grafické znázornění použitých souprav | 79 |
| Příloha 2: Znázornění a popis použitých nákladních vozů..... | 82 |

Seznam použitého značení

| | |
|-----------------|--|
| Bo'Bo' | empirický vzorec pro výpočet měrného vozidlového odporu čtyřnápravových lokomotiv |
| CFD | Computational fluid dynamics (numerická metoda modelování proudění tekutin) |
| CO ₂ | oxid uhličitý |
| ČD 163 | jednosystémová lokomotiva Českých drah |
| ČSD | Československé dráhy |
| DNS | Direct Numerical Simulation |
| Eas | čtyřnápravový vysokostěnný nákladní vůz |
| Falls | čtyřnápravový výsypný nákladní vůz |
| HV | hnací vozidlo |
| LES | Large Eddy Simulation |
| Mach | Machovo číslo, násobek rychlosti zvuku |
| Nex | vlak kategorie Nákladní expres |
| ÖBB 1016 | jednosystémová lokomotiva Rakouských spolkových drah |
| RANS | Reynolds Average Navier-Stokes |
| Sggrss | šestinápravový vůz pro přepravu kontejnerů |
| T4 | empirický vzorec pro výpočet měrného vozidlového odporu ložených čtyřnápravových vozů |
| TV | tažené vozidlo |
| U4 | empirický vzorec pro výpočet měrného vozidlového odporu prázdných čtyřnápravových vozů |
| V7 | předpis pro trakční výpočty |
| w _D | měrný odpor dopravovaných vozidel |
| Zacens | čtyřnápravový kotlový nákladní vůz |

1 Úvod

Železniční doprava je dlouhodobě považována za jeden z nejekologičtějších a nejméně energeticky náročných druhů dopravy. Je to dáno zejména malými odpory proti pohybu, které souvisí s malou dotykovou plochou mezi kolem a kolejnicí a možností tvořit vlaky, kdy za jednu čelní plochu (čelo lokomotivy, motorového vozu) lze umístit větší počet vozidel, což vede k relativně nízkému aerodynamickému odporu.

Zavedené hodnoty měrných vozidlových odporů dnes však pravděpodobně neodpovídají skutečným jízdním odporům, což může to být způsobeno novými konstrukčními řešeními nebo i špatným postupem měření zavedených měrných vozidlových odporů. Obecně je trend při konstrukci moderních kolejových vozidel hodnoty odporů co možná nejvíce snižovat a tím dále snižovat energetickou náročnost železniční dopravy.

Práce se zabývá rozbořem jízdních odporů vlaku, podrobně je zaměřena na aerodynamický odpor. Bude zkoumána velikost odporu vzduchu vlaku v závislosti na tvaru lokomotivy, ložení vybraných druhů nákladních vozů a řazení nákladních vlaků. Pro modelování proudění vzduchu kolem vlaku a výpočet aerodynamického odporu bude využit software STAR-CCM+.

Cílem práce je modelování a simulace proudění vzduchu okolo vlakových souprav a jeho vliv na aerodynamický odpor vlaku. Dále na základě výsledků simulací navrhnout opatření pro minimalizaci aerodynamického odporu a tím dosáhnout snížení energetické náročnosti vozby nákladních vlaků.

2 Energetická náročnost nákladní dopravy

Každý druh dopravy má svá specifika, proto je nutné pro výběr vhodného přemístění osob nebo nákladu zvolit optimální druh dopravy nebo jejich kombinaci na základě:

- množství přepravovaného materiálu (osob)
- délce přepravní vzdálenosti
- požadované rychlosti přepravy
- druhu přepravovaného nákladu

Železniční doprava

Tento druh dopravy je nejčastěji využíván pro přepravu nákladu ve větších množstvích na delší vzdálenosti. Uplatní se zejména ve vnitrozemské přepravě, nejvyužívanější je zejména v Rusku a v Číně. Průměrná přepravní vzdálenost je v Evropě okolo 1000 km. Výhodná je zejména pro podniky s napojením na železniční síť, které produkují nebo přijímají velká množství nákladu.

Výhody:

- velkoobjemová přeprava zásilek
- nezávislost na situaci na silnicích
- nízká spotřeba energie vzhledem k množství přepraveného nákladu
- nižší přepravní náklady než u silniční přepravy při delších vzdálenostech

Nevýhody:

- nutnost budování nákladních terminálů
- méně hustá dopravní síť oproti silniční síti
- vysoké fixní náklady

Silniční doprava

Silniční doprava je obecně nejrozšířenější. Hustá síť silnic umožňuje provádět dodávky "od domu do domu". Tvoří počáteční a koncové články v kombinované přepravě. Je rychlá a operativní, vyniká nízkými fixními náklady. Nevýhodou je horší vliv na životní prostředí oproti železniční dopravě.

Výhody:

- hustá dopravní síť
- nízké fixní náklady
- přeprava "od domu do domu"
- na kratších přepravních vzdálenostech je velmi rychlá

Nevýhody:

- závislost na dopravní situaci na silnicích
- zatěžování životního prostředí množstvím emisí
- množství nákladu je omezeno kapacitou vozidla

Letecká doprava

Je využívána zejména pro přepravu osob. Při dlouhých přepravních vzdálenostech (přes 1000 km) je rychlejší než ostatní druhy dopravy. Typickým příkladem přepravovaného nákladu jsou kusové zásilky a pošta, dále zboží podléhající rychlé zkázce, zboží o vysoké hodnotě a pod. Na letištích je nutno budovat terminály pro skladování a překládání nákladu na nákladní silniční vozidla, které jej dovezou koncovým zákazníkům.

Výhody:

- rychlost na delších přepravních vzdálenostech
- předvídatelnost časů přepravy

Nevýhody:

- vysoké přepravní náklady
- nutnost budování nákladních terminálů
- doba k proclení a doba překládky často znehodnotí přepravní rychlost letadla
- omezená přepravní kapacita

Vodní doprava

Vodní dopravu lze rozdělit na vnitrozemskou (řiční) a námořní. Hlavní přepravní komoditou jsou kontejnery, hromadné substráty (руды, ropa, uhlí) a větší průmyslové výrobky. Přeprava je velmi pomalá, poměrně ekologická (přeprava velkého množství najednou) a ekonomicky výhodná na delší vzdálenosti (400 km a více). Je velmi

závislá na počasí (nízká hladina vody, led), některé vodní trasy jsou splavné jen několik měsíců v roce.

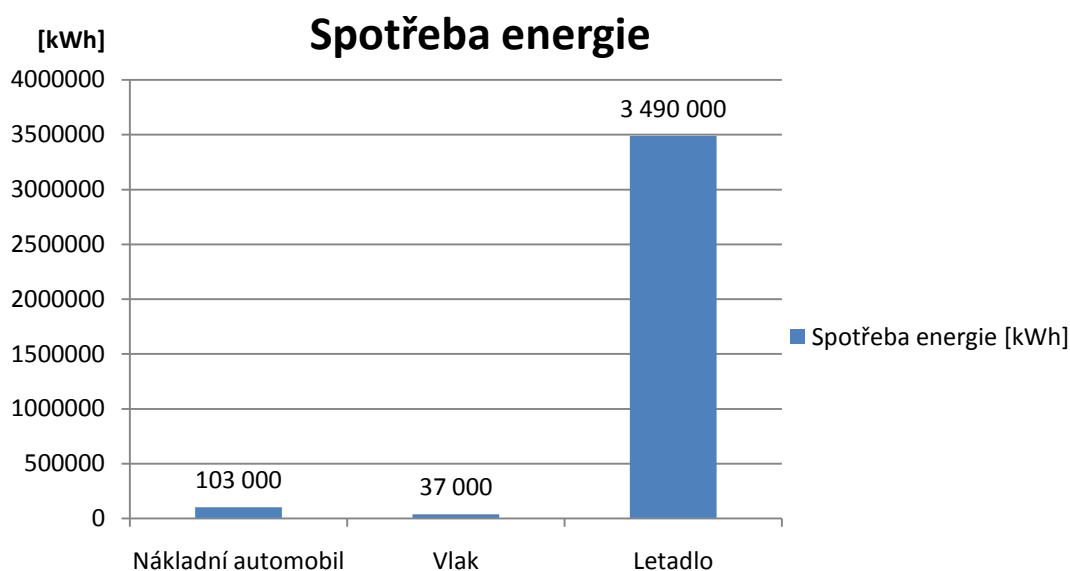
Výhody:

- velká přepravní kapacita
- ekonomicky výhodná na delších přepravních vzdálenostech
- relativně ekologická

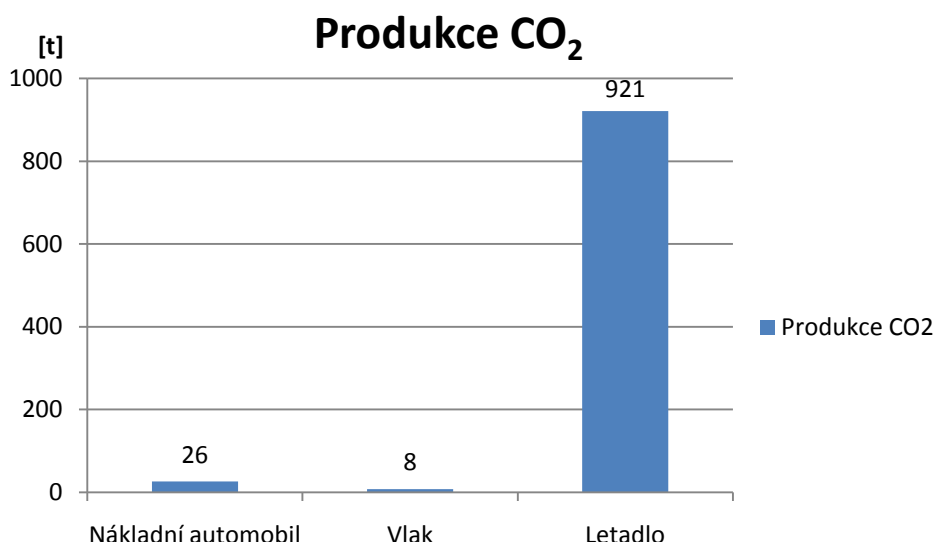
Nevýhody:

- silný vliv stavu počasí
- vysoké fixní náklady
- velmi nízká přepravní rychlost
- náklady vynaložené pro překládku a manipulaci s komoditami

Pro porovnání energetické náročnosti železniční, silniční a letecké dopravy jsem využil výpočtový model EcoTransIT. Na trase Ostrava - Praha jsem zvolil přepravu nákladu o hmotnosti 1000 tun. Výslednou spotřebu energie a množství emisí CO₂ znázorňují následující obrázky (Obr. 1, Obr. 2).



Obr. 1: Spotřeba energie při přepravě 1000 tun nákladu z Ostravy do Prahy [16]



Obr. 2: Produkce CO₂ při přepravě 1000 tun nákladu z Ostravy do Prahy [16]

Nejvíce energie by bylo spotřebováno leteckou přepravou, nejméně pak při přepravě po železnici. Největší ekologickou zátěž představuje letecká přeprava, nejmenší pak přeprava železniční. Pro porovnání ekologické zátěže je níže uvedena tabulka (Tab. 1) s přehledem celkových emisí CO₂ za rok 2013 pro jednotlivé druhy dopravy v ČR.

Tab. 1: Emise CO₂ za rok 2013 pro jednotlivé druhy dopravy v ČR

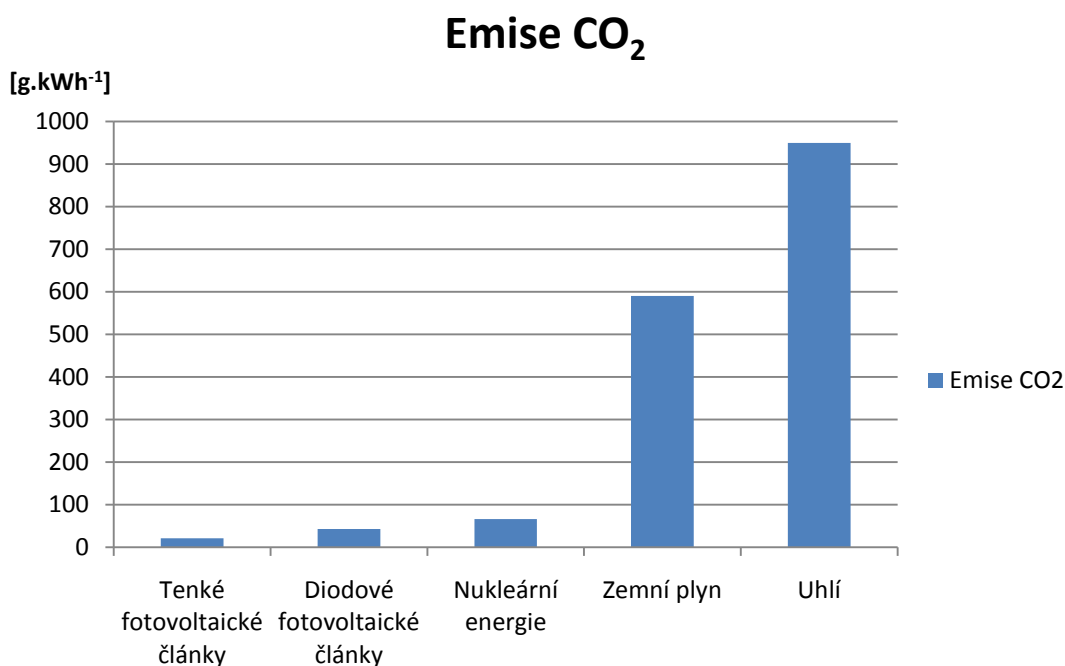
| Druh dopravy | Množství emisí CO ₂ [t.10 ³] |
|---|---|
| Doprava celkem | 17 590 |
| Individuální automobilová doprava | 9 750 |
| Silniční veřejná osobní doprava včetně autobusů MHD | 1 779 |
| Silniční nákladní doprava | 4 885 |
| Železniční doprava - motorová trakce | 267 |
| Vodní doprava | 16 |
| Letecká doprava | 893 |

Zdroj: [https://www.sydos.cz/cs/rocenka-2013/rocenka/htm_cz/obsah7.html]

Z pohledu efektivity a ekologie provozované železniční dopravy je trend využívat k pohonu vozidel elektrickou energii. Elektrická hnací vozidla jsou často výkonnější než vozidla vybavená spalovacími motory a mohou rekuperovat svou kinetickou energii při brzdění. V místě provozu elektrických hnacích vozidel je menší znečištění

ovzduší, zároveň jsou zpravidla tyto vozidla méně hlučná a nehrozí únik pohonných hmot v případě nehody.

Využívanou elektřinu je ale potřeba nejdříve vyrobit. Výsledná produkce emisí železniční dopravy pak závisí na konkrétním způsobu výroby elektrické energie. Měrnou produkci emisí CO₂ v závislosti na způsobu výroby elektrické energie znázorňuje následující obrázek (Obr. 3).



Obr. 3: Porovnání emisí CO₂ na výrobu 1 kWh pro vybraná paliva a zdroje elektrické energie [17]

Nejmenší ekologickou zátěž z produkce CO₂ představuje výroba elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů, nejčastěji ve vodních, slunečních a větrných elektrárnách. Výroba elektřiny v jaderných elektrárnách představuje také relativně nízkou zátěž, téměř desetkrát menší než výroba v elektrárnách, kde je palivem zemní plyn. Největší měrnou produkci CO₂ mají uhelné elektrárny, kde se může vlivem spalování méně kvalitního uhlí produkce CO₂ a dalších škodlivin ještě zvýšit. V následující tabulce (Tab. 2) je uvedena měrná produkce CO₂ pro vybrané země.

Tab. 2: Množství emisí CO₂ na výrobu 1 kWh v jednotlivých oblastech:

| Oblast | g CO ₂ /kWh |
|--------------------|------------------------|
| Evropská unie | 347 |
| Česká republika | 589 |
| Slovensko | 197 |
| Polsko | 781 |
| Německo | 460 |
| Rakousko | 187 |
| Francie | 79 |
| Spojené království | 457 |
| Švédsko | 29 |
| Rusko | 383 |
| Kosovo | 1287 |

Zdroj : [<http://www.sunearthtools.com/tools/CO2-emissions-calculator.php>]

Z tabulky (Tab. 2) jsou patrné kontrasty měrné produkce CO₂ mezi vybranými zeměmi. Švédsko získává většinu elektrické energie z obnovitelných zdrojů a jaderných elektráren, proto má velice nízkou měrnou produkci CO₂. Ve Francii je velké množství jaderných elektráren, které mají většinový podíl při výrobě elektrické energie, proto jsou i měrné emise relativně nízké. V České republice je však měrná produkce CO₂ vyšší, zejména z důvodu velkého počtu uhelných elektráren, které často spalují i méně kvalitní uhlí. Pro zajímavost jsem do výčtu zemí přidal i Kosovo, kde je měrná produkce CO₂ velmi vysoká.

V roce 2013 bylo v České republice železniční dopravou spotřebováno 1,197.10⁹ kWh [https://www.sydos.cz/cs/rocenka-2013/rocenka/htm_cz/index.html] elektrické energie, je však nutné počítat s faktem, že celková spotřeba elektrické energie zahrnuje i spotřebu energie provozních jednotek, osvětlení stanic a další spotřebu energie nutnou pro zabezpečení provozu železniční dopravy. Pro výpočet produkce CO₂ při výrobě spotřebované elektrické energie bude využit následující vztah (1):

$$m_{CO_2E} = E_e \cdot \varphi \text{ [g]} \quad (1)$$

kde:

- m_{CO_2E} [g] - množství vyprodukovaného CO₂ výrobou elektrické energie
- E_e [kWh] - celková spotřeba elektrické energie
- φ [$\frac{g}{kWh}$] - měrná produkce množství emisí CO₂ na 1 kWh pro konkrétní oblast

Výpočet produkce emisí CO₂ při výrobě elektrické energie spotřebované železniční dopravou v ČR za rok 2013:

$$m_{CO_2E} = E_e \cdot \varphi = 1,197 \cdot 10^9 \cdot 589 = 705,5 \cdot 10^9 \text{ g} \rightarrow 705,5 \cdot 10^3 \text{ t}$$

Celkovou produkci emisí CO₂ železniční dopravy za rok 2013 v ČR lze pak určit prostým součtem množství emisí motorové trakce a spotřebované elektrické energie v železniční dopravě.

$$m_C = m_{CO_2E} + m_{CO_2M} = 705,5 \cdot 10^3 + 267 \cdot 10^3 = 972,5 \cdot 10^3 \text{ t}$$

Celkem by bylo odhadem za rok 2013 provozováním železniční dopravy vypuštěno do ovzduší 972,5 tisíc tun CO₂. Na celkovém množství emisí CO₂ má větší podíl spotřeba elektrické energie. I když do celkové spotřeby elektrické energie jsou započítány i jiné složky než spotřeba trakční energie, nelze elektrickou trakci označit za mnohem ekologičtější než trakci motorovou*. Je to dáno zejména neekologickou výrobou elektrické energie v ČR s poměrně vysokou měrnou produkcí emisí CO₂ na 1 kWh vyrobené energie. Ve Švédsku nebo ve Francii by železniční doprava v elektrické trakci byla mnohem ekologičtější než v motorové trakci.

*Pozn.: Motorové lokomotivy mají měrnou spotřebu motorové nafty okolo $230 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$, hmotnost vyprodukovaného CO₂ je přitom zhruba třikrát vyšší, celkově tak na 1 kWh vyprodukují asi 690 g CO₂. V ČR pak motorová lokomotiva při stejné spotřebě energie vyprodukuje zhruba jen o 15% více emisí CO₂ než lokomotiva elektrická spotřebou neekologicky vyrobené elektrické energie.

3 Jízdní odpory vlaku

V této kapitole bude rozebrána základní teorie pohybu vlaku a bude podrobněji zaměřena na odpor valivý a aerodynamický.

3.1 Teorie pohybu kolejových vozidel

Pro zjednodušený popis pohybu vlaku slouží rovnice pohybu vlaku. Platí za předpokladu, kdy vlak považujeme jako homogenní a zanedbáváme jeho délku. Síly působící na vlak jsou soustředěny do těžiště tohoto homogenního vlaku, tím byl vlak zredukován na jeden hmotný bod. Rovnice pohybu vlaku (2) vyjadřuje rovnováhu mezi silami působícími na vlak ve směru a proti směru jízdy. Obecně se jedná o síly tažné, odporové a brzdné [1].

$$F_0 - B - \sum O = 0 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

kde:

- F_0 [N] - tažná síla
- B [N] - brzdná síla
- $\sum O$ [N] - součet všech odporů

Protože při jízdě kolejových vozidel není žádoucí současně vyvíjet tažnou i brzdnou sílu (až na speciální případy), bývá při výpočtech jedna z těchto složek nulová. Odpory lze dále rozdělit na odpory traťové, vozidlové a odpor ze zrychlení [1]:

$$\sum O = O_T + O_V + O_a \quad [\text{N}] \quad (3)$$

kde:

- O_T [N] - traťové odpory
- O_V [N] - vozidlové odpory
- O_a [N] - odpor zrychlení

Odpory lze dále rozdělit na odpory aktivní, ty jsou dány konstrukčním řešením vozidla, souvisí s účinností přenosu výkonu nebo ztrátami v převodech a odpory pasivní, označované též jako jízdní odpory.

3.1.1 Traťové odpory

Velikost traťových odporů je ovlivněna stavebním uspořádáním tratě (tunely, oblouky, sklonové poměry) a tíhou (případně i délkou) vlaku. Obecně je odpor trati

určen na základě redukovaného sklonu (10). Výpočet traťového odporu je realizován následujícím vztahem (4) [1]:

$$O_T = G_V \cdot s_r \cdot 10^{-3} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

kde:

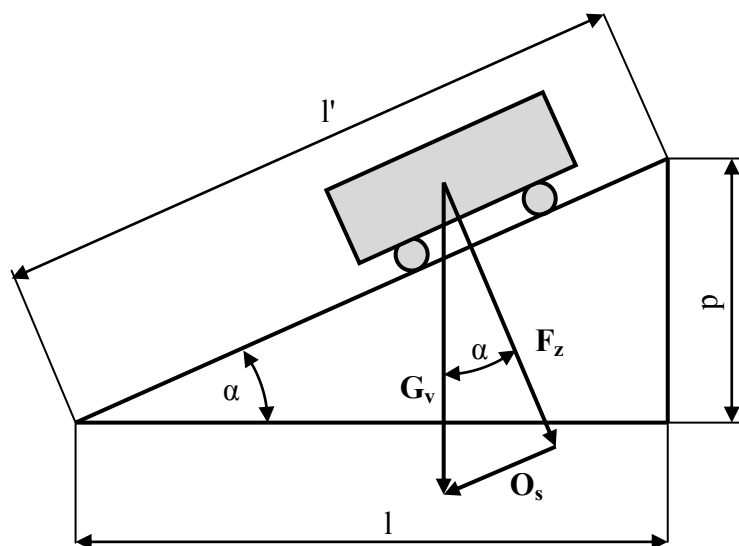
- G_V [N] - tíha vozidla (nebo vozidel)
- s_r [‰] - redukovaný sklon traťového úseku

Traťové odpory lze dále rozdělit na:

- O_{skl} [N] - odpor sklonu
- O_{obl} [N] - odpor oblouku
- O_{tun} [N] - odpor tunelu

Odpor sklonu

Každé těleso při pohybu po nakloněné rovině rozkládá svou tíhovou sílu na jednotlivé silové složky, nejinak je tomu i v případě jízdy kolejového vozidla ve stoupání nebo ve spádu. Tíhová síla G_V je rozložena na sílu normálovou F_Z působící kolmo na podložku a sílu O_{skl} , která působí proti pohybu vozidla - ta tvoří odpor sklonu proti pohybu. Velikost odporové síly O_{skl} ovlivňuje sklon tratě a hmotnost vozidla. Rozklad sil je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 4).



Obr. 4 Rozložení tíhy vozidla G_V na nakloněné rovině [1]

Z obrázku (Obr. 4) je na základě využití goniometrické funkce možné vyjádřit vztah (5) pro výpočet odporu sklonu [1]:

$$O_{skl} = G_V \cdot \sin \alpha = G_V \cdot s \cdot 10^{-3} \quad [\text{N}] \quad (5)$$

kde:

- sklon s je podílem převýšení na daném úseku a jeho délky (6)

$$s = 1000 \cdot \sin \alpha = \frac{p}{l} \quad [\text{‰}] \quad (6)$$

V běžné praxi bývá využit pro určení délky úseku jeho průmět do vodorovné roviny. Tím se změní i použitá goniometrická funkce při výpočtu odporu sklonu [1]:

$$O_{skl} = G_V \cdot \operatorname{tg} \alpha = G_V \cdot s \cdot 10^{-3} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Výpočet sklonu s je realizován následujícím vztahem (8) [1]:

$$s = 1000 \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{p}{l} \quad [\text{‰}] \quad (8)$$

Tento výpočet není matematicky přesný, při sklonech použitých na železnici je však rozdíl ve velikosti sklonu velmi malý, při sklonu 2° je rozdíl ve výsledné hodnotě sklonu s 0,06 %.

Odpor oblouku

Při průjezdu kolejového vozidla obloukem vlivem setrvačnosti vozidla vznikají síly odchylovající vozidlo z přímého směru. Tyto síly vyvolávají tření mezi kolem (okolkem) a kolejnicí a působí jako pasivní odpory. Hodnota tohoto odporu je určována na základě empirických vzorců, je vyjádřena jako přídavný sklon ke sklonovému úseku tratě, na kterém se oblouk, nebo jeho část nachází. Většinou je odpor oblouku pro každý druh kolejového vozidla nebo typ tratě určován jiným vztahem, zejména na základě rozchodu kolejí, provozní rychlosti nebo typu vozidla (konvenční, vysokorychlostní, vozidla lehké železnice). Pro konvenční tratě s rozchodem 1435 mm je přídavný sklon oblouku určen vztahem (9) [1]:

$$s_{obl} = \frac{600}{R} \quad [\text{‰}] \quad (9)$$

Pokud na sebe navazují protisměrné oblouky, navyšuje se hodnota přídavného sklonu o 50% ($s_{obl} \cdot 1,5$).

Odpor tunelu

Při průjezdu tunelem musí vlak překonat zvýšený aerodynamický odpor, v podstatě se vlak chová jako píst a svou jízdou v tunelu vytlačuje sloupec vzduchu, zároveň druhou stranou nasává do tunelu další vzduch. Odpor tunelu je možné podobně jako u odporu oblouku vyjádřit jako přídavný sklon. Jeho hodnota je určena

na základě počtu kolejí v tunelu. Pro jednokolejný tunel je tato hodnota $s_{tun}=2\text{ ‰}$, pro dvojkolejný tunel $s_{tun}=1\text{ ‰}$. Tyto hodnoty jsou zjištěny empirickým měřením.

U vozidel metra je pak tento odpor překonáván při rozjezdu, menší měrou při ustálené rychlosti a zároveň při brzdění, kdy je setrvačností sloupce vzduchu vozidlo tlačeno vpřed. Neblahým důsledkem je pak zvýšená spotřeba energie při rozjezdu a nutnost použití větší brzdné síly při brzdění.

Výpočet redukovaného sklonu

Redukovaný sklon je používán k redukci (zjednodušení) traťového profilu. Touto redukcí je ke každému sklonovému úseku připočtena hodnota přídatného sklonu oblouku a tunelu na tomto úseku v odpovídajícím poměru. K výpočtu redukovaného sklonu slouží následující vztah (10) [1]:

$$s_r = \frac{s_i \cdot l_i + \sum s_{obl} \cdot l_{obl_i} + \sum s_{tun} \cdot l_{tun_i}}{l_i} \quad [\text{‰}] \quad (10)$$

kde:

- s_r [‰] - redukovaný sklon
- l_i [m] - délka i -tého sklonového úseku
- s_{obl} [‰] - přídatný sklon odporu oblouku
- l_{obl_i} [m] - délka oblouku na i -tém úseku
- s_{tun} [‰] - přídatný sklon odporu tunelu
- l_{tun_i} [m] - délka tunelu na i -tém úseku

3.1.2 Vozidlový odpor

Vozidlový odpor je ovlivňován zejména konstrukčním provedením vozidla. Lze jej popsat jako součet tří složek, které se liší svou závislostí na rychlosti vozidla [1].

$$O_V = O_f + O_l + O_{vz} \quad [\text{N}] \quad (11)$$

kde:

- O_f [N] - valivý odpor, s rychlostí se nemění, je konstantní
- O_l [N] - odpor tření v ložiscích, lineárně závislý na rychlosti
- O_{vz} [N] - odpor prostředí, kvadraticky závislý na rychlosti

Tento odpor lze určit na základě měrných koeficientů jednotlivých složek vztažených na tíhu vozidla. Tyto koeficienty vozidlového odporu jsou empiricky zjištěné (obvykle výběhovými zkouškami) a uspořádané v polynomu druhého stupně, tím lze určit součinitel vozidlového odporu dle vztahu (12) [1]:

$$o_V = a + b \cdot V + c \cdot V^2 [-] \quad (12)$$

kde:

- $a, b, c [-]$ - koeficienty jednotlivých složek vozidlového odporu
- $V [\text{km} \cdot \text{h}^{-1}]$ - okamžitá rychlost vozidla
- $o_v [-]$ - součinitel vozidlového odporu

Výslednou hodnotu vozidlového odporu lze získat dle vztahu (13) [1]:

$$O_V = G_V \cdot o_V [\text{N}] \quad (13)$$

3.1.3 Odpor zrychlení

Při změně rychlosti (například při rozjezdu a brzdění) je vozidlo nuceno překonat další síly působící proti této změně rychlosti - musí překonat vlastní setrvačnost. Tyto síly představují odpor proti zrychlení. Obecně se tento odpor dělí na dvě složky:

- Odpor zrychlení posuvných hmot
- Odpor zrychlení rotujících hmot

Odpor zrychlení posuvných hmot

Odpor proti zrychlení posuvných hmot lze obecně vyjádřit jako součin hmotnosti vozidla a jeho zrychlení [1].

$$O_{pos} = m_V \cdot a = \frac{G_V}{g} \cdot a [\text{N}] \quad (14)$$

kde:

- $O_{pos} [\text{N}]$ - odpor zrychlení posuvných hmot
- $m_V [\text{kg}]$ - hmotnost vozidla
- $a [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ - zrychlení vozidla

Odpor zrychlení rotujících hmot

Kromě posuvného pohybu je nutné počítat s vlivem rotujících částí vozidla spojených s přenosem podélných sil stykem kolo - kolejnice. Jedná se o dvojkolí, převodové ústrojí a hmoty vázané převodem (rotory trakčních motorů nebo rotující části spalovacích motorů). Obecný vztah pro výpočet odporu zrychlení rotujících hmot je uveden níže (15) [1].

$$O_{rot} = O_{dv} + O_p + O_{mot} \text{ [N]} \quad (15)$$

kde:

- O_{rot} [N] - odpor zrychlení rotujících hmot
- O_{dv} [N] - odpor zrychlení dvojkolí
- O_p [N] - odpor zrychlení převodového ústrojí
- O_{mot} [N] - odpor zrychlení rotujících částí motoru

Tento vztah lze dále rozepsat dle vztahu (16) a zároveň jej lze pomocí redukce momentů setrvačnosti vztažených na dvojkolí dále zjednodušit dle vztahu (17) [1]:

$$O_{rot} = \frac{I_{dv} \cdot a}{r^2} + \frac{I_p \cdot a}{r^2} + \frac{I_{mot} \cdot i_c^2 \cdot a}{r^2} \text{ [N]} \quad (16)$$

$$O_{rot} = \frac{I_{Rdv} \cdot a}{r^2} \text{ [N]} \quad (17)$$

kde:

- I_{dv} [kg.m²] - moment setrvačnosti dvojkolí
- I_p [kg.m²] - moment setrvačnosti převodovky vztažený na dvojkolí
- I_{mot} [kg.m²] - moment setrvačnosti motoru
- I_{Rdv} [kg.m²] - redukovaný moment setrvačnosti všech rotujících částí vztažený na dvojkolí
- i_c [-] - celkový převodový poměr mezi motorem a dvojkolím
- r [m] - poloměr dvojkolí

Součtem dílčích složek je pak určen celkový odpor ze zrychlení [1]:

$$O_a = O_{pos} + O_{rot} = \frac{G_V}{g} \cdot a + \frac{I_{Rdv} \cdot a}{r^2} = \frac{G_V}{g} \cdot a \cdot \left(1 + \frac{I_{Rdv} \cdot g}{r^2 \cdot G_V}\right) \text{ [N]} \quad (18)$$

Výraz v závorce lze dále zjednodušit, zlomek může být nahrazen součinitelem vlivu rotujících hmot ρ . Výsledkem je vztah (19) [1]:

$$O_a = \frac{G_V}{g} \cdot a \cdot (1 + \rho) \text{ [N]} \quad (19)$$

Hodnota součinitele ρ je dána pro většinu typů vozidel, nejmenší je u ložených nákladních vozů, největší pak u motorových vozů nebo posunovacích lokomotiv s velkým převodovým poměrem mezi motorem a dvojkolím. Pro normalizovaný vlak ($M_{tv}=400$ t) je používána hodnota součinitele $\rho=0,06$.

3.1.4 Základní rovnice pohybu vlaku

Na základě výše uvedených vztahů pro výpočet odporových sil lze obecnou rovnici rovnováhy (2) dále rozepsat na základní rovnici popisující pohyb vlaku (20) [1]:

$$F_0 - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T - (G_L + G_D) \cdot \frac{a}{g} \cdot (1 + \rho) = 0 \quad (20)$$

Úpravou rovnice (20) uvedené výše je získán konečný tvar rovnice pohybu vlaku (21) [1]:

$$F_0 - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T = (G_L + G_D) \cdot \frac{(1 + \rho)}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad [\text{N}] \quad (21)$$

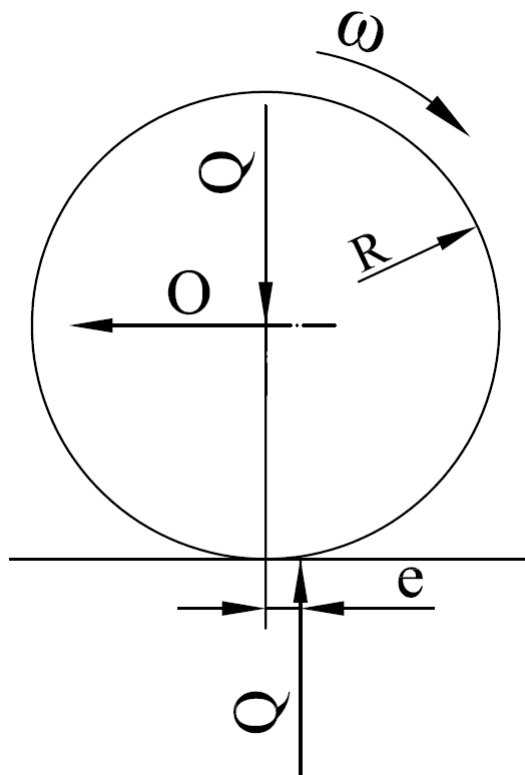
kde:

- F_0 [N] - tažná síla na obvodu kola
- G_L [N] - tíha lokomotivy
- G_D [N] - tíha dopravovaných vozidel
- o_L [-] - součinitel vozidlového odporu lokomotivy
- o_D [-] - součinitel vozidlového odporu dopravovaných vozidel
- o_T [-] - součinitel odporu tratě

3.2 Odpor valení

V teorii pohybu kolejových vozidel je odpor valení součástí vozidlového odporu, jedná se o jeho konstantní složku, jejíž velikost nezávisí na rychlosti vozidla.

Odpor valení je důsledkem deformace kola a kolejnice. Reakce koleje na zatížení kola je posunuta ve směru pohybu o rameno valivého odporu. Touto posunutou reakcí vzniká moment silové dvojice. Pokud je tento moment vztažen k poloměru kola, je získán odpor valení. Základní schéma působení sil (Obr. 5) a rovnice výpočtu odporu valení (22, 23) jsou uvedeny níže.



Obr. 5: Schéma působení sil

Obecný výpočet odporu valení dle obrázku (Obr. 5):

$$M_O = Q \cdot e = O \cdot R \text{ [Nm]} \quad (22)$$

$$O = \frac{Q \cdot e}{R} \text{ [N]} \quad (23)$$

kde:

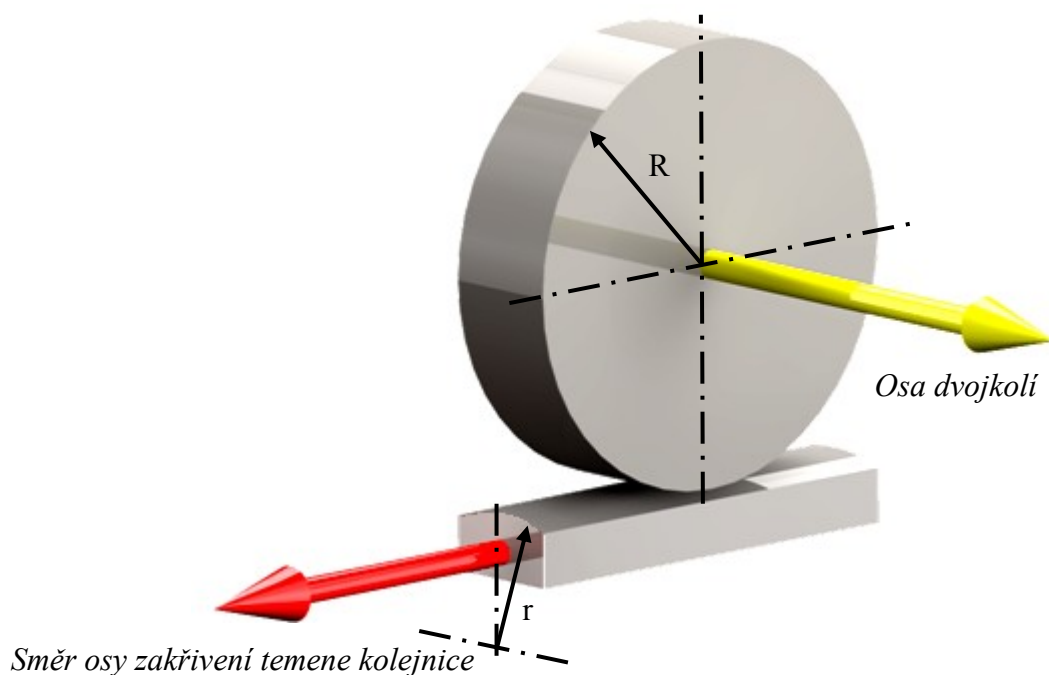
- O [N] - odpor valení
- Q [N] - zatížení kola
- R [m] - poloměr kola
- e [m] - rameno valivého odporu

Výpočet koeficientu a vozidlového odporu:

$$a = \frac{e}{R} [-] \quad (24)$$

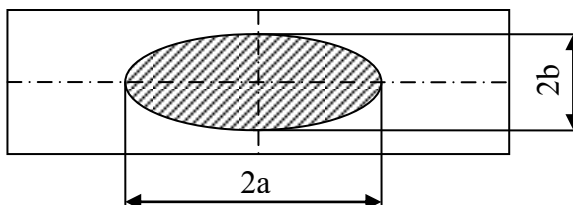
Styk kola a kolejnice si lze představit jako dotýkající se dva mimoběžné válce, jejichž osy jsou vzájemně kolmé (Obr. 6). Poloměry těchto válců jsou [2]:

- R - poloměr kola (165 mm - 625 mm)
- r - poloměr zakřivení temene kolejnice (obvykle 300 mm)



Obr. 6: Znázornění kola a temene kolejnice jako dvou válců [Autor]

Pokud je možné považovat styk kola a kolejnice jako styk dvou mimoběžných válců, pak má plocha styku podle Hertzovy teorie kontaktního napětí tvar elipsy (Obr. 7). Tato elipsa má svou hlavní osu ve směru osy válce o menším poloměru, obvykle tedy ve směru osy koleje [2].



Obr. 7: Dotyková plocha kola a kolejnice [2]

Velikost hlavní a vedlejší osy elipsy lze vypočítat na základě obecných vztahů (25, 26) [2]:

$$a = \alpha \cdot X \text{ [mm]} \quad (25)$$

$$b = \beta \cdot X \text{ [mm]} \quad (26)$$

kde:

- α a β - konstanty závislé na poměru $R:r$ (viz. Tab. 3)
- X - deformace, viz. výpočet níže (27) [2]

$$X = \sqrt{\frac{3Q \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r}\right)}} \text{ [mm]} \quad (27)$$

kde:

- E [MPa] - modul pružnosti oceli, $E = 2 \cdot 10^5$ MPa
- μ [-] - Poissonovo číslo, $\mu = 0,3$

Tab. 3: Hodnoty konstant α a β v závislosti na poměru $R:r$:

| R/r | α | β | R/r | α | β |
|-------|----------|---------|-------|----------|---------|
| 1,0 | 1,00 | 1,00 | 4,5 | 1,74 | 0,65 |
| 1,5 | 1,15 | 0,88 | 5,0 | 1,82 | 0,63 |
| 2,0 | 1,27 | 0,81 | 5,5 | 1,88 | 0,61 |
| 2,5 | 1,39 | 0,76 | 6,0 | 1,95 | 0,60 |
| 3,0 | 1,49 | 0,72 | 6,5 | 2,01 | 0,59 |
| 3,5 | 1,58 | 0,69 | 7,0 | 2,07 | 0,58 |
| 4,0 | 1,66 | 0,67 | 7,5 | 2,13 | 0,57 |

Zdroj: [2]

Velikost odporu valení dále ovlivňuje kvalita povrchu kola a kolejnice. Obecně platí, že čím hladší bude povrch provozních ploch, tím bude odpor valení menší. U vozidel se špalíkovou brzdou dochází k otěru jízdní plochy kola, vzniká tak poměrně drsná plocha, která má za následek větší odpor valení, dochází také k výraznému opotřebení jízdní plochy kola a částečně se zvýší i opotřebení temena pojížděné kolejnice. Konstantní složku vozidlového odporu může dále ovlivňovat typ použitých ložisek (valivá nebo kluzná, jejich odpor je závislý i na teplotě) a částečně i mikrogeometrie koleje.

Obecně se s novými konstrukčními řešeními odpor valení snižuje, v současnosti jsou používána výhradně valivá ložiska a kotoučové brzdy (ty však zejména na osobních vozech). U moderních vozidel se velikost konstantního členu vozidlového odporu pohybuje v intervalu $a \in <1 \cdot 10^{-3}; 1,5 \cdot 10^{-3}>$, u lokomotiv je jeho hodnota vyšší zhruba dvakrát.

3.3 Aerodynamický odpor

Aerodynamický odpor je součástí vozidlového odporu, představuje jeho složku kvadraticky závislou na rychlosti vozidla. Při nízkých rychlostech je velikost aerodynamického odporu téměř zanedbatelná (při bezvětří), při vysokých rychlostech je však tento odpor dominantní, zejména u vysokorychlostních vozidel. Tento odpor je reakcí na dynamický tlak vzduchu, který působí na čelní plochu

vozidla. Velikost aerodynamického odporu ovlivňuje rychlost vozidla, velikost čelní plochy vozidla ve směru jízdy, hustota vzduchu, tvar a řazení vozidla.

Obecný výpočet aerodynamického odporu (28) [3]:

$$F_a = C_x \cdot S \cdot p_{dyn} = C_x \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{tek} \cdot v^2 \text{ [N]} \quad (28)$$

kde:

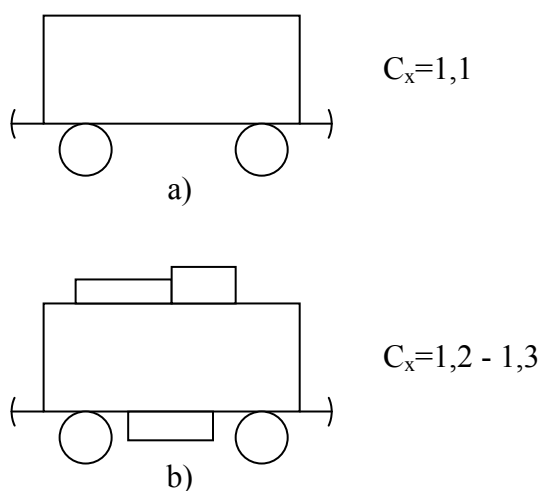
- F_a [N] - aerodynamický odpor
- C_x [-] - součinitel odporu závislý na tvaru překážky
- S [m²] - plocha překážky ve směru proudící tekutiny
- p_{dyn} [N.m⁻¹] - dynamický tlak na plochu S
- ρ_{tek} [kg.m³] - hustota tekutiny
- v [m.s⁻¹] - rychlost proudící tekutiny

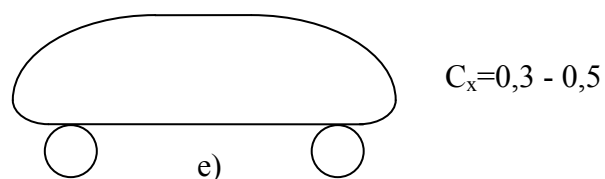
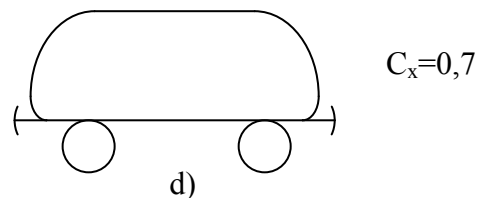
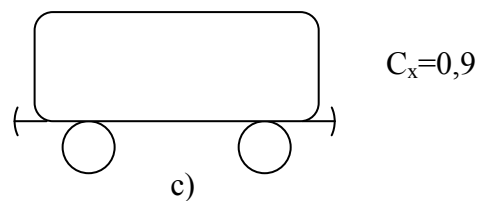
Při výpočtu odporu vzduchu vozidla jsou charakteristické hodnoty:

- čelní plocha $S=12 \text{ m}^2$ při plně využitém obrysu
- hustota vzduchu $\rho_{vzd} \approx 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ v závislosti na teplotě vzduchu

Hodnota součinitele tvaru C_x je ovlivněna jednak tvarem vozidla a také jeho řazením ve vlaku. Obecně platí, že největší odpor vzduchu mají vozidla na čele soupravy, kde je její jízdu stlačován vzduch před ní, tím vzniká zmíněný dynamický tlak působící na čelo prvního vozidla této soupravy. Zvýšený odpor vzduchu lze očekávat i u posledního vozidla soupravy, za kterým vzniká podtlak.

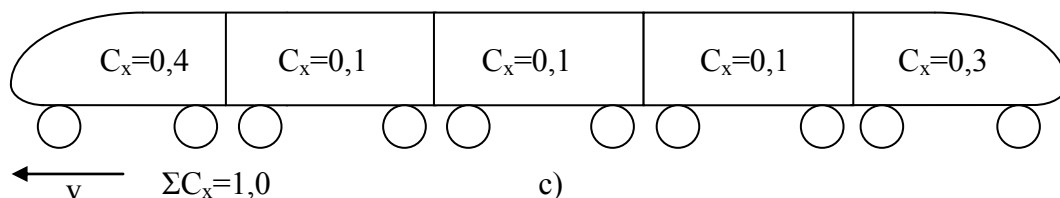
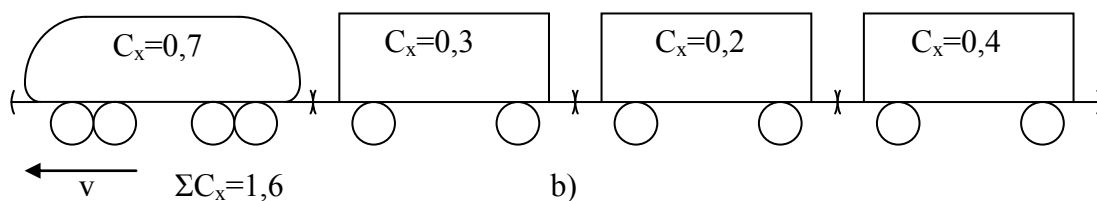
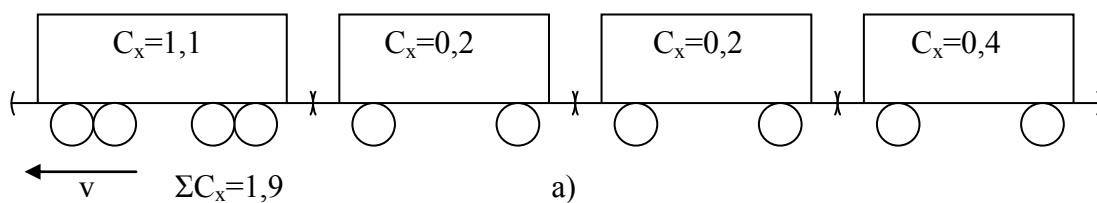
Na následujících obrázcích (Obr. 8, Obr. 9) jsou příklady různých vozidel a souprav, kde je ke každému vozidlu přiřazena hodnota součinitele C_x v závislosti na jeho tvaru a řazení v soupravě.





Obr. 8: Závislost součinitele C_x v závislosti na tvaru vozidla [10]

a) jednoduché vozidlo, b) vozidlo s výzbrojí mimo hlavní skříň, c) vozidlo se zaoblenými okraji skříňě, d) moderní hnací vozidlo, e) moderní motorové vozy



Obr. 9: Závislost součinitele C_x v závislosti na tvaru vozidla a řazení ve vlaku [10]

a) vlak se starším typem HV, b) vlak s moderním HV, c) moderní vysokorychlostní jednotka

Hodnotu C_x pro celý vlak dle obrázku (Obr. 9) ovlivňuje tvar vozidla na čele a konci vlaku (lokomotiva, motorový či řídící vůz) a návaznost skříně vozů (u osobních vozů mezivozové přechody, u nákladních vozů tvar čela).

Další prvky ovlivňující celkový aerodynamický odpor:

- sběrače
- výfuky
- umístění trakční výzbroje
- zakrytí spodní části vozidel
- madla a stupačky
- tvar bočnice skříně

Pokud je známa čelní plocha vozidla, součinitel odporu vzduchu a hmotnost vozidla, lze hodnotu koeficientu c pro výpočet vozidlového odporu určit následujícím vztahem (29):

$$c = \frac{C_x \cdot S \cdot \rho_{vz}}{2 \cdot m \cdot g \cdot 3,6^2} \text{ [N} \cdot \text{kN}^{-1}] \quad (29)$$

4 Analýza obtékání vzduchu kolem železničních vozidel

4.1 Teorie obtékání a odporu těles

Popis mezní vrstvy:

Před obtékanou rovinnou deskou, která je umístěna rovnoběžně k proudu tekutiny, mají částice tekutiny stejnou počáteční rychlost a směr. Při obtékání desky mají částice, které na desce ulpí, nulovou rychlost. Ty pak brzdí další částice, které se pohybují v blízkosti obtékané desky. Třením částic s rozdílnou kinetickou energií vzniká teplo. Mezní vrstva je oblast v těsné blízkosti desky, kde dochází ke změně rychlosti, existuje gradient rychlosti a platí [3]:

$$\frac{\partial v}{\partial y} \neq 0 [-] \quad (30)$$

Postupným zbrzdováním dalších částic tekutiny se mezní vrstva vzdáleností od náběžné hrany zvětšuje. Rychlostní profil má spojitý přechod od nulové rychlosti na stěně desky do počáteční rychlosti proudu tekutiny.

Charakter mezní vrstvy závisí na typu proudění, zda je laminární nebo turbulentní. Obecně se typ proudění určuje na základě hodnoty Reynoldsova čísla Re , jehož výpočet se řídí vztahem níže (31) [4]:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} [-] \quad (31)$$

kde:

- Re [-] - Reynoldsovo číslo
- v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] - střední rychlost tekutiny
- d [m] - charakteristický rozměr (průměr potrubí)
- ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] - kinematická viskozita tekutiny

Aby bylo možno určit, zda se jedná o laminární nebo o turbulentní proudění, je stanovena kritická hodnota Reynoldsova čísla $Re_{krit} = 2320$.

- $Re < Re_{krit}$ - laminární proudění
- $Re > Re_{krit}$ - turbulentní proudění

Při posuzování, zda je proudění vzduchu laminární nebo turbulentní, je využíván jiný vztah pro výpočet Re (32) [5], kde je zohledňována hustota vzduchu. Oproti

předchozímu vztahu (31) je možné zjistit typ proudění v závislosti i na teplotě vzduchu, protože hustota vzduchu je funkcí jeho teploty.

$$Re = \frac{v \cdot \rho_{tek} \cdot d}{\mu} [-] \quad (32)$$

kde:

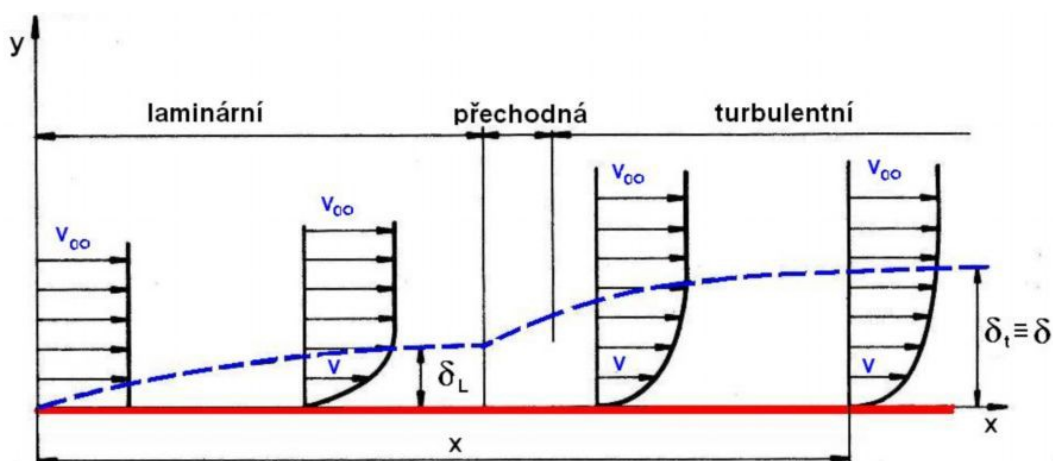
- μ [N.s.m⁻²] - dynamická viskozita tekutiny

V případě obtékání tekutiny rovinnou deskou je Re závislé na vzdálenosti od náběžné hrany desky x , výpočet Re_x dle vztahu (33) [3]:

$$Re_x = \frac{v \cdot x}{\nu} [-] \quad (33)$$

V dostatečné vzdálenosti x za náběžnou hranou desky po směru proudění jsou rychlostní profily proudící tekutiny podobné a se vzrůstající vzdáleností se už významně nemění. Pokud je proud před deskou laminární, vzniká na začátku desky laminární mezní vrstva, při $Re_x = 10^5$ přechází v turbulentní mezní vrstvu s laminární podvrstvou. Pokud je proud před deskou turbulentní, je mezní vrstva turbulentní již od náběžné hrany desky.

Na obrázku níže (Obr. 10) je znázorněna velikost mezní vrstvy v závislosti na jejím typu a vzdálenosti od náběžné hrany desky.



Obr. 10: Mezní vrstva na desce a rychlostní profil proudící kapaliny [3]

Odtržení mezní vrstvy

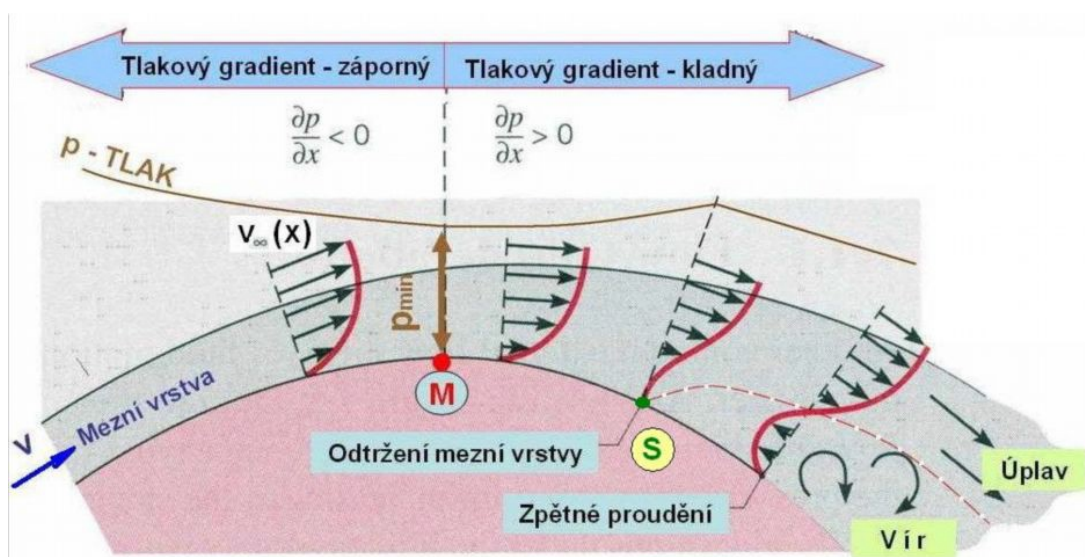
Při obtékání zaoblených těles (koule, válce, křídla letadla, automobilu) dochází k odtržení mezní vrstvy. Protože při obtékání těchto těles dochází ke změně rychlosti proudění, mění se i tlak. To je dáno Bernoulliho rovnicí (33) [4]:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho_{tek}} + g \cdot h = konstantní \quad (33)$$

kde:

- v [m.s⁻¹] - střední rychlost tekutiny
- p [Pa] - tlak v daném místě
- $g \cdot h$ [J.kg⁻¹] - měrná potenciální energie

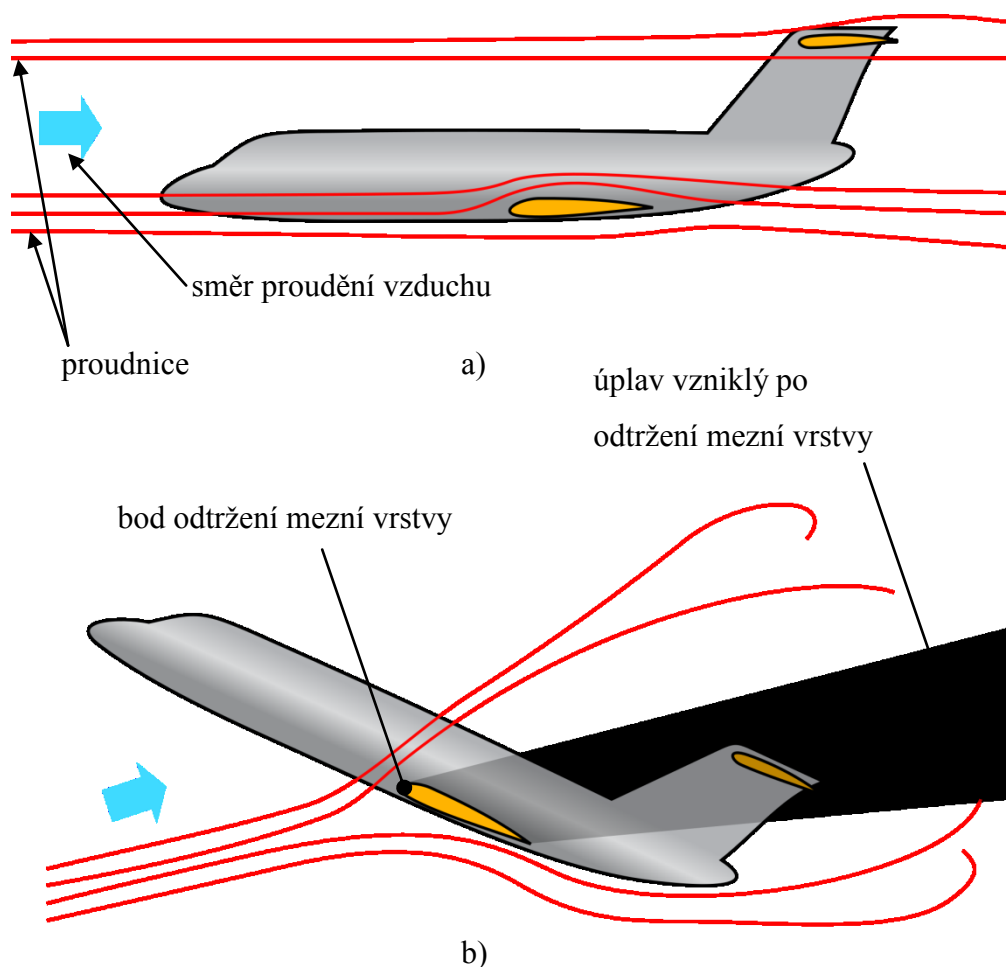
Ve své podstatě se jedná o vyjádření zákona zachování kinetické energie proudící tekutiny. Pokud se tedy například zvýší rychlost, musí se snížit tlak.



Obr. 11: Odtržení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [3]

V první fázi se v blízkosti tělesa postupně zvyšuje rychlost obtékající tekutiny až do bodu (M), kdy dosáhne maxima a tlak v tomto místě dosáhne minima. Za tímto bodem začíná tlak růst, částice jsou zpomalovány vnitřním třením v tekutině a také zvyšujícím se tlakem, který má snahu částice tekutiny vracet zpět do místa, kde je tlak minimální. Rychlost v mezní vrstvě klesne, čímž se začne deformovat, až v určitém bodě (S) dojde k odtržení mezní vrstvy a částice začínají proudit podél stěn tělesa proti smyslu proudění tekutiny.

U letadel je však tento stav nežádoucí. Letecké křídlo má takový profil, aby se možnost odtržení mezní vrstvy co nejvíce eliminovala - zakřivení křídla je pokud možno co nejplynulejší a nejmírnější, tím je plynulá a mírná i změna tlaku obtékajícího vzduchu. K odtržení mezní vrstvy při obtékání křídla letadla dochází tehdy, když je příliš vysoký úhel náběhu proudícího vzduchu (obvykle okolo 20°). V tomto případě dochází k odtržení mezní vrstvy na náběžné hraně křídla, která má relativně malý poloměr zakřivení a vznikají tak velké rozdíly v rychlosti proudění a v tlaku před a za náběžnou hranou (viz. Obr. 11). Při odtržení mezní vrstvy na vrchní straně křídla dochází ke ztrátě vztlaku, anglicky je tento jev označován jako "stall". V případě ztráty vztlaku je nutné upravit úhel náběhu proudění vzduchu na křídlo. To lze provést zvýšením rychlosti letadla (zvýšením výkonu motoru) nebo srovnáním podélné osy letadla se směrem proudění vzduchu (obvykle mírným sklopením nosu letadla).



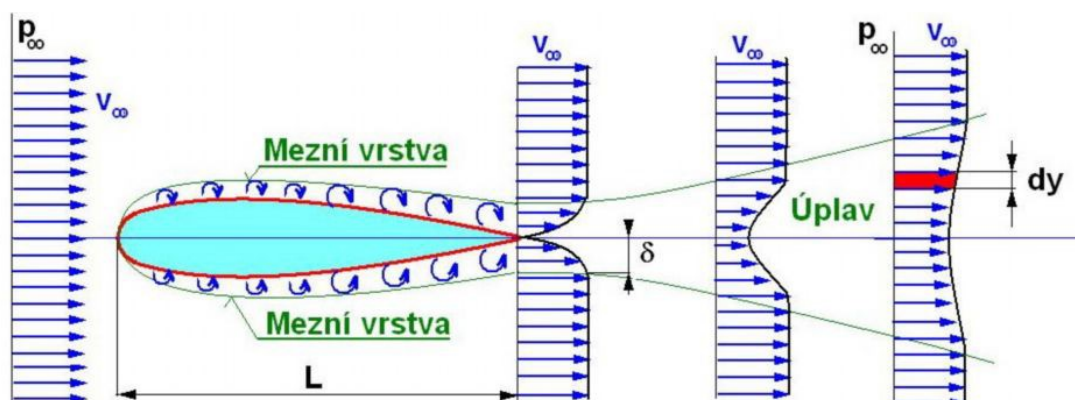
Obr. 12: Ztráta vztlaku u letadel [6]

a) normální let (laminární obtékání křídla),

b) ztráta vztlaku (odtržení mezní vrstvy na náběžné hraně křídla)

Úplav

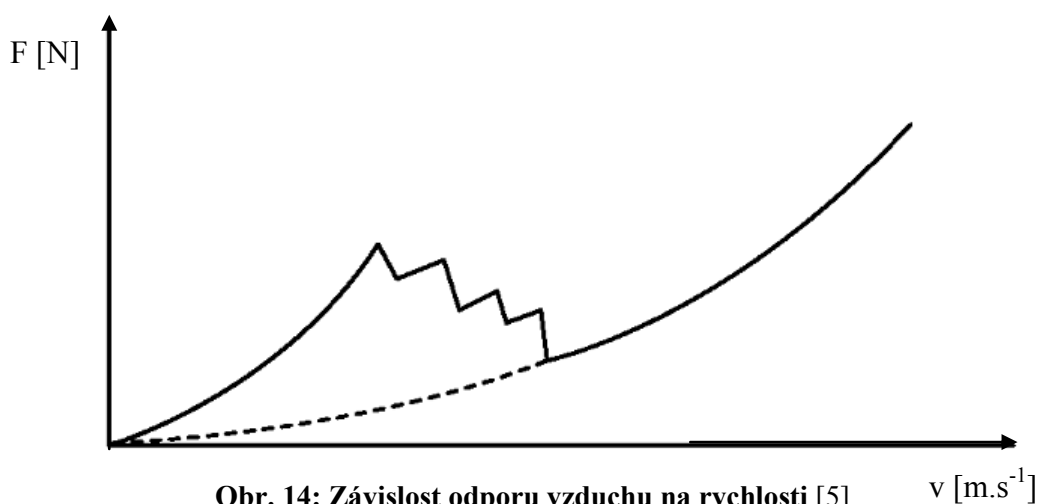
Svým způsobem je mezní vrstva jakýmsi vírovým polem v blízkosti obtékaného tělesa. Víry jsou z povrchu tělesa unášeny proudící tekutinou, kde společně za tělesem vytvářejí úplav. Ten je se zvětšující se vzdáleností širší a postupně se vyplňuje, v dostatečné vzdálenosti od tělesa je profil proudící tekutiny přibližně stejný jako profil proudu před obtékaným tělesem.



Obr. 13: Úplav za obtékaným tělesem [3]

Odpor těles

Aerodynamický odpor těles je definován vztahem (28). Velikost odporu se ale nemění v celém rozsahu rychlosti proudění jen na základě druhé mocniny rychlosti, ale také závisí na typu proudění. Při přechodu z laminárního na turbulentní proudění dochází ke změně závislosti odporu na rychlosti. Od určité rychlosti se začne odpor zmenšovat a poté znovu začne růst, ale nyní podle jiné křivky.



Obr. 14: Závislost odporu vzduchu na rychlosti [5]

Při laminárním proudění se částice tekutiny pohybují po proudu v hladkých a pravidelných trajektoriích, téměř nepřecházejí mezi vrstvami. Tok částic je souvislý, každá částice vcházející do sledovaného prostoru má stejnou rychlost a směr jako

všechny částice před ní. Při turbulentním proudění dochází k přecházení částic mezi vrstvami, výměně hmoty a energie mezi jednotlivými proudnicemi, což v konečném důsledku způsobí vyšší odpor.

Zdá se tedy, že když bude obtékané těleso mít tvar přibližující se tvaru jednotlivých proudnic, bylo by možné dosáhnout nulového odporu. K tomu však nemůže dojít a to ani při nízkých rychlostech proudění. Existují proto i další faktory, které přispívají ke vzniku odporu těles při jejich obtékání tekutinou.

Stokesovo proudění nastává při nízkých hodnotách Re . Podle Stokesova zákona je odpor funkcí rychlosti, viskozity a čelní plochy obtékaného tělesa.

Viskozita vzduchu klesá s rostoucí teplotou. Větší změny tlaku při konstantní teplotě nezpůsobí významnou změnu viskozity. Existuje několik možností, jak vyjádřit změnu viskozity, základem je vztah (34) [5]:

$$\mu(T) = \mu(T_0) - BT^n \quad (34)$$

kde:

- B, n [-] - konstanty
- T [K] - teplota
- T_0 [K] - referenční teplota

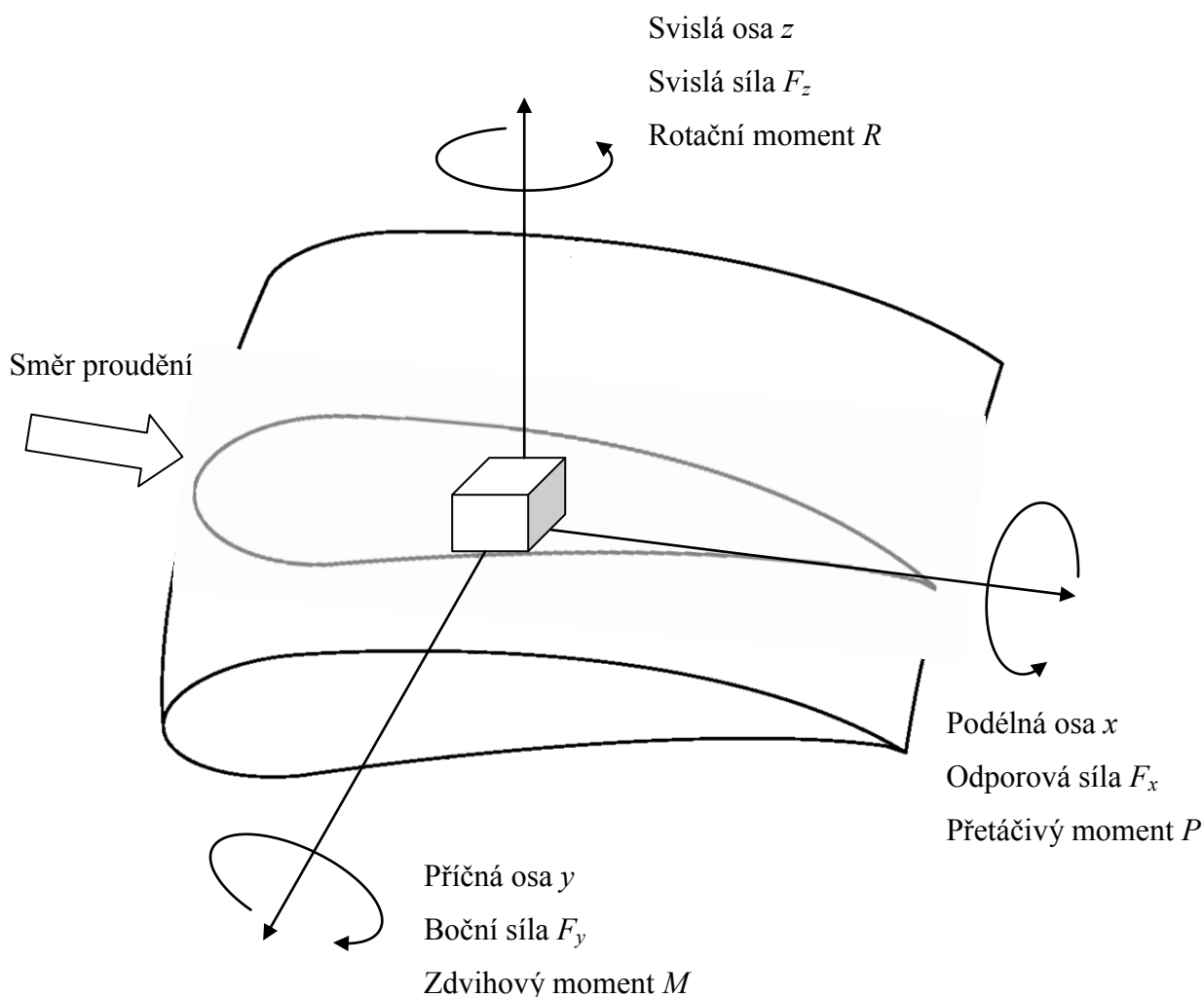
Při vysokých hodnotách Re je odpor funkcí hustoty, rychlosti, čelní plochy tělesa a viskozity. Odpor je závislý na kvadrátu rychlosti a výkon pro překonání odporu je závislý na třetí mocnině rychlosti. Výkon je zmíněn ve spojitosti se spotřebou pohonu vozidla, které bude aerodynamický odpor překonávat. Kromě výkonu tak bude se třetí mocninou rychlosti růst i spotřeba vozidla, zvláště pak u vozidel, kde je aerodynamický odpor dominantní složkou celkového vozidlového odporu (například právě u železničních vozidel). Následující tabulka (Tab. 4) porovnává, na jakých faktorech závisí aerodynamický odpor při nízkých a vysokých hodnotách Re .

Tab.4: Faktory, na kterých závisí odpor vzduchu při nízkých a vysokých hodnotách Re

| Při nízkých hodnotách Re | Při vysokých hodnotách Re |
|----------------------------|---------------------------------|
| Závislost na rychlosti | Závislost na kvadrátu rychlosti |
| Závislost na čelní ploše | Závislost na čelní ploše |
| Závislost na viskozitě | Závislost na hustotě |
| Nezávislost na hustotě | Nezávislost na viskozitě |

Zdroj: [5]

Při obtékání tělesa nevzniká pouze síla ve směru proudící tekutiny, ale také další síly a momenty, které jsou závislé na tvarech tělesa. Této vlastnosti využívají například křídla letadel (vztlaková síla působí svisle vzhůru) a také závodní automobily (zvyšování přtlaku pomocí spoileru). Při obtékání tělesa mohou vzniknout síly a momenty ve všech třech osách, jak je to popsáno na následujícím obrázku (Obr. 15).



Obr. 15: Působení sil a momentů na obtékané těleso [5]

4.2 Působení bočního větru na železniční vozidla

Kromě odporu vzduchu proti pohybu je příčinou vývoje nových aerodynamických tvarů vozidel boční vítr. Ten má největší vliv u vysokorychlostních vozidel, která mají menší hmotnost než lokomotivy klasické stavby, což může způsobit nežádoucí nestabilitu vozidla při jízdě. Nestabilitu nezpůsobuje pouze boční vítr, ale také tlakové rázy protijedoucích vozidel, které se taktéž mohou pohybovat vysokou rychlostí.

Tvary vozidel jsou řešeny tak, aby co možná největší část vzduchu směřovala nad vozidlo. Toto řešení omezí zejména boční tlakové rázy na protijedoucí vozidla a částečně i zvyšuje přítlak ke koleji na předním podvozku vozidla, podobně jako spoiler u závodních automobilů.



Obr. 16: Tvar čela jednotky Siemens Velaro D [8]

Pro eliminaci nežádoucího vlivu bočního větru mají čela některých současných vysokorychlostních vozidel tvar *kachního zobáku*. Tato vozidla bývají nejčastěji k vidění v přímořských nebo horských oblastech, kde jsou často vystaveny vlivu bočního větru. Taková vozidla jezdí například ve Španělsku (Obr. 17).



Obr. 17: Tvar čela jednotky Renfe Talgo [11]

5 Návrh modelu aerodynamického působení na železniční vozidla

V dnešní době je možné zkoumat aerodynamické vlastnosti těles dvěma hlavními způsoby:

- analýzou modelu v aerodynamickém tunelu
- numericky, využitím CFD software (Computational fluid dynamics)

5.1 Modelování v aerodynamických tunelech

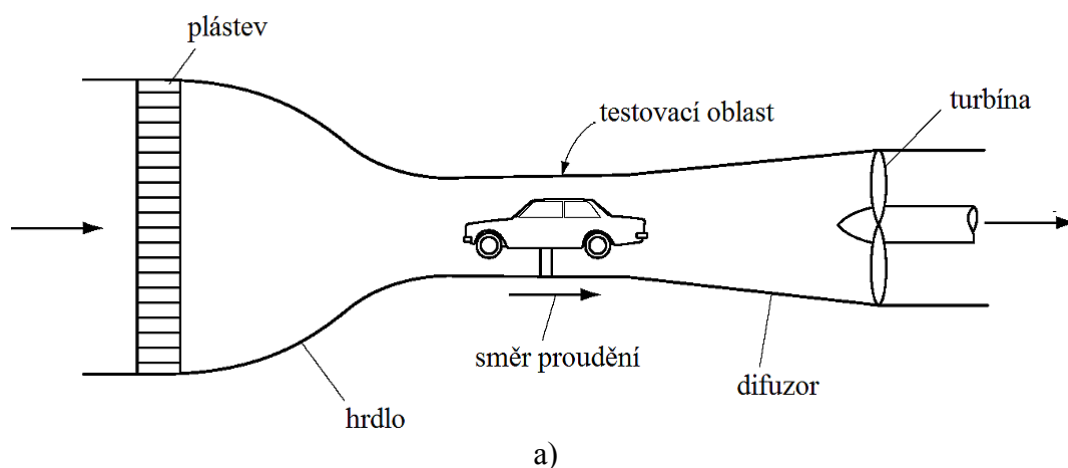
Aerodynamický tunel je prostředí, kde rychlost, směr proudění a teplota vzduchu jsou nezávislé na okolním prostředí. Podmínky v tunelu jsou podle potřeby ovládány a kontrolovány. Při testování se obvykle používají zmenšené modely skutečných vozidel.

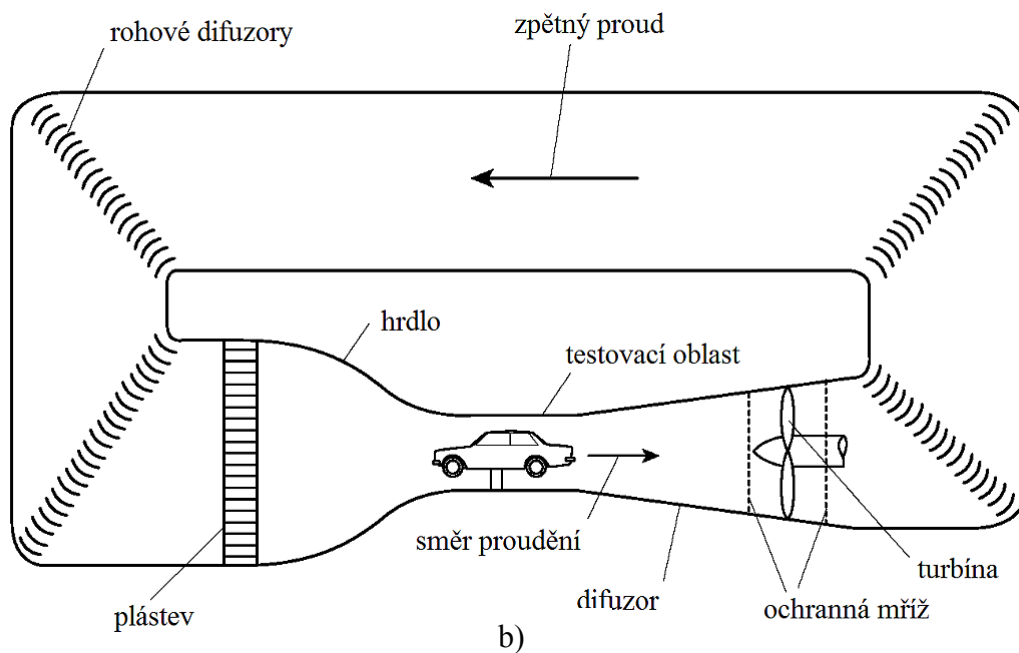
Tunely lze rozdělit podle jejich vlastností, jako jsou:

- systém oběhu proudícího vzduchu
- rychlost proudícího vzduchu
- tlak vzduchu
- velikost

Podle systému oběhu proudícího vzduchu lze rozdělit tunely na:

- tunely s uzavřeným oběhem proudícího vzduchu
- tunely s otevřeným oběhem proudícího vzduchu





Obr. 18: Systémy aerodynamických tunelů [5]

a) otevřený systém, b) uzavřený systém

Hlavní výhodou tunelu s otevřeným systémem oběhu vzduchu je jeho nízká cena, nevýhodou je vyšší příkon pohonu než u uzavřeného systému a jeho hlučnost. Výhodou uzavřeného systému je menší spotřeba energie a stabilita testovacích podmínek, nevýhodou pak vyšší cena a nárůst teploty během delšího testování.

Podle rychlosti proudícího vzduchu se tunely rozdělují na:

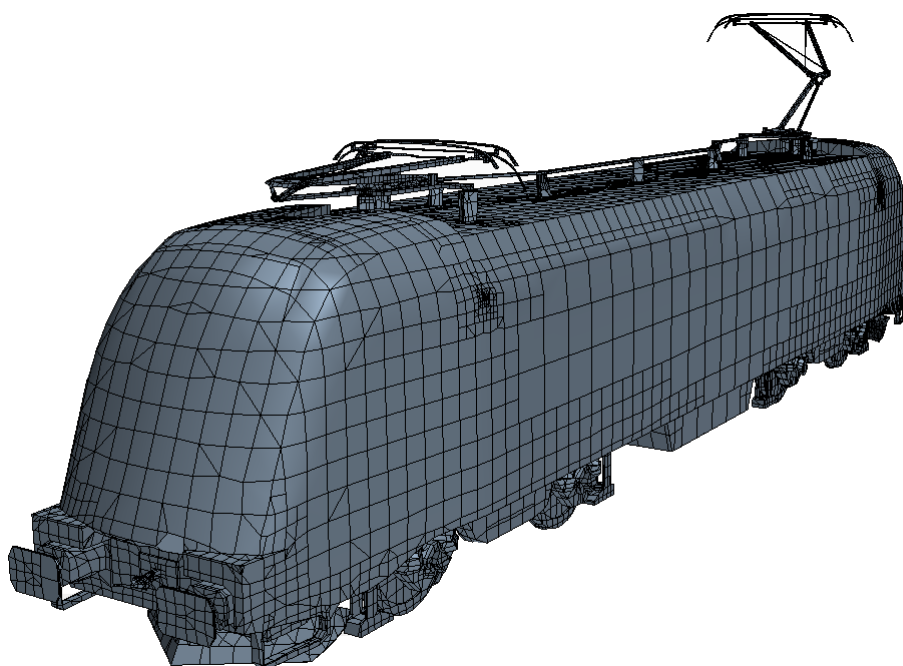
- subsonické, rychlost proudění do 0,8 Mach (do 980 km.h⁻¹)
- transonické, rychlost proudění 0,8 - 1,2 Mach (980 - 1470 km.h⁻¹)
- supersonické, rychlost proudění 1,2 - 5 Mach (1470 - 6125 km.h⁻¹)
- hypersonické, rychlost proudění vyšší než 5 Mach (nad 6125 km.h⁻¹)

Podle tlaku vzduchu lze tunely rozdělit na:

- tunely s atmosférickým tlakem vzduchu
- tunely s proměnným tlakem vzduchu

5.2 Matematické modelování, popis CFD software

Podobně jako u metody konečných prvků je každý 3D model převeden na síť. Hustota vytvořené sítě má vliv na výsledek simulace a na celkový čas výpočtu. Kompromisem mezi přesností výsledku a náročností na výpočetní výkon je takové síťování, kdy je na kritických místech síť jemnější a na relativně souvislých plochách je síť méně hustá. Například u lokomotivy na obrázku (Obr. 19) je síť jemná zejména v oblasti podvozků, nárazníků, sběračů a aerodynamického čela. Na bočnicích je síť výrazně méně hustá.



Obr. 19: Hustota sítě v závislosti na tvaru lokomotivy [Autor]

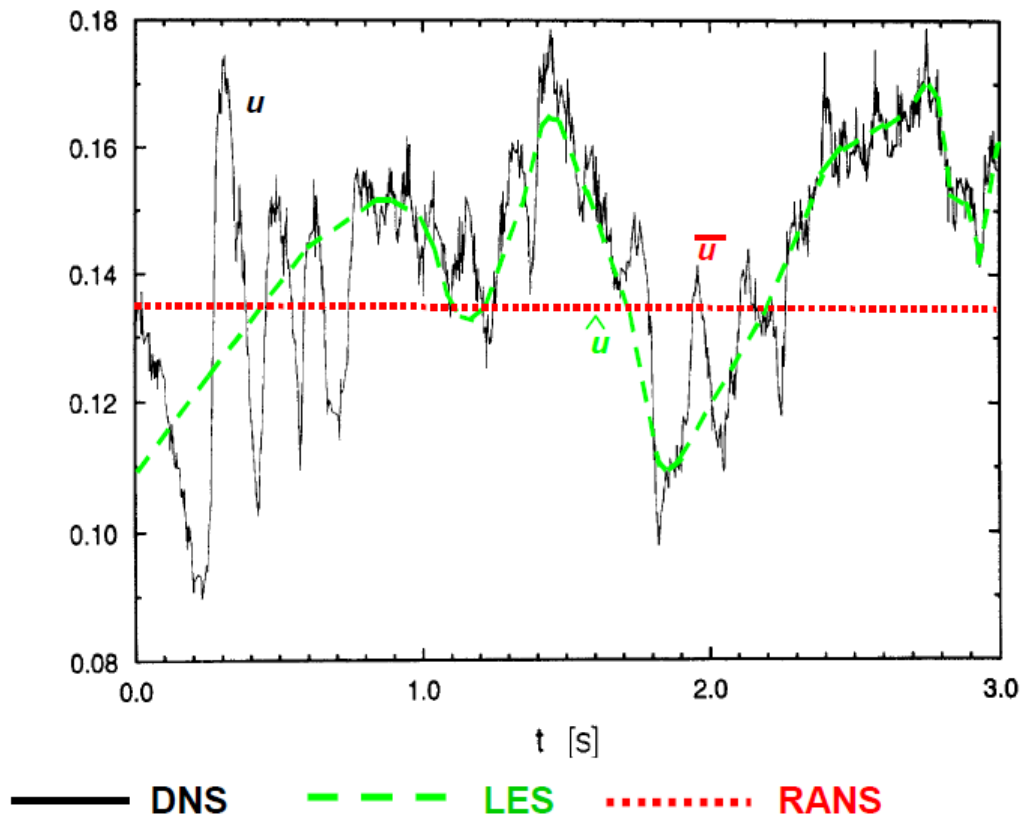
Pro matematické modelování turbulentního proudění se v dnešní době používají tři odlišné metody, které vycházejí z rovnic popisujících proudění [6]:

- Metoda přímé simulace (DNS - Direct Numerical Simulation)
- Metoda velkých vírů (LES - Large Eddy Simulation)
- Metoda časového středování (RANS - Reynolds Average Navier-Stokes)

Nejvyššími nároky na výpočetní výkon se vyznačuje metoda přímé numerické simulace (DSN), která vyžaduje velmi jemnou síť modelu a s rostoucím Reynoldsovým číslem počet uzlových bodů sítě dále narůstá. V současné době je velmi obtížné řešit úlohy touto metodou z důvodu nedostatečného výpočetního výkonu.

U metody velkých vírů není síť modelu tak jemná jako u DSN. Protože se malé turbulentní víry významně nepodílí na transportních jevech, pro matematické modelování velkých vírů není třeba velmi jemná síť, která by zachycovala i malé víry. Pro tuto metodu je výpočetní výkon dnešních počítačů dostačující.

Metoda časového středování (RANS) je na výpočetní výkon nejméně náročná a v praxi je dnes nejpoužívanější. Jedná se o kompromis mezi náročností na výpočetní výkon a věrohodností výsledku. Tuto metodu jsem využil při simulaci ve STAR-CCM+.



Obr. 20: Porovnání výsledků jednotlivých matematických modelů v čase [6]

K výpočtu RANS budu využívat dvourovnicový k-ε model. Tvary rovnic použitých v modelu (vycházející z Navier - Stokesových rovnic) (35, 36) [6]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \cdot \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - C_D \frac{\sqrt{k^3}}{l} \quad (35)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \cdot \nu_t \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \cdot \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (36)$$

5.2.1 Popis STAR-CCM+

Pro modelování aerodynamického působení na železniční vozidla jsem zvolil software STAR-CCM+. Tento CFD software slouží ke komplexnímu modelování proudění tekutin s využitím různých matematických modelů. Kromě modelování aerodynamického odporu lze modelovat přestup tepla, spalování, vliv gravitace, radiace, funkci tepelných výměníků a ventilátorů.

Z dostupných CFD software má poměrně jednoduché ovládání. Sítování modelů a opravy sítě pro potřeby matematického modelu jsou prováděny automaticky. Je navržen pro práci s modely o počtu buněk sítě i $100 \cdot 10^6$ a více.

5.3 Validace simulace, návrh modelu a testovaných souprav

Aby bylo možné považovat výsledky simulací za věrohodné, bylo nutné nejdříve porovnat hodnoty z reálného měření s hodnotami ze simulace. Z validovaného modelu jsem převzal nastavení fyzikálního modelu i pro simulaci souprav.

5.3.1 Validace fyzikálního modelu

Abych ověřil věrohodnost výsledků ze simulace, vytvořil jsem jednoduchý model krátkého válce (kruhové desky) a výpočtem jsem zjistil jeho součinitel odporu vzduchu a porovnal získanou hodnotu s empirickými hodnotami pro těleso tohoto tvaru. Toto těleso jsem umístil do středu tunelu čtvercového průřezu. Vstupní parametry modelu jsou následující:

$$l_{\text{tun}} = 4 \text{ m}$$

$$d_{\text{tun}} = 1 \text{ m}$$

$$v = 40 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\rho_{\text{vzd}} = 1,18 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$p = 101325 \text{ Pa}$$

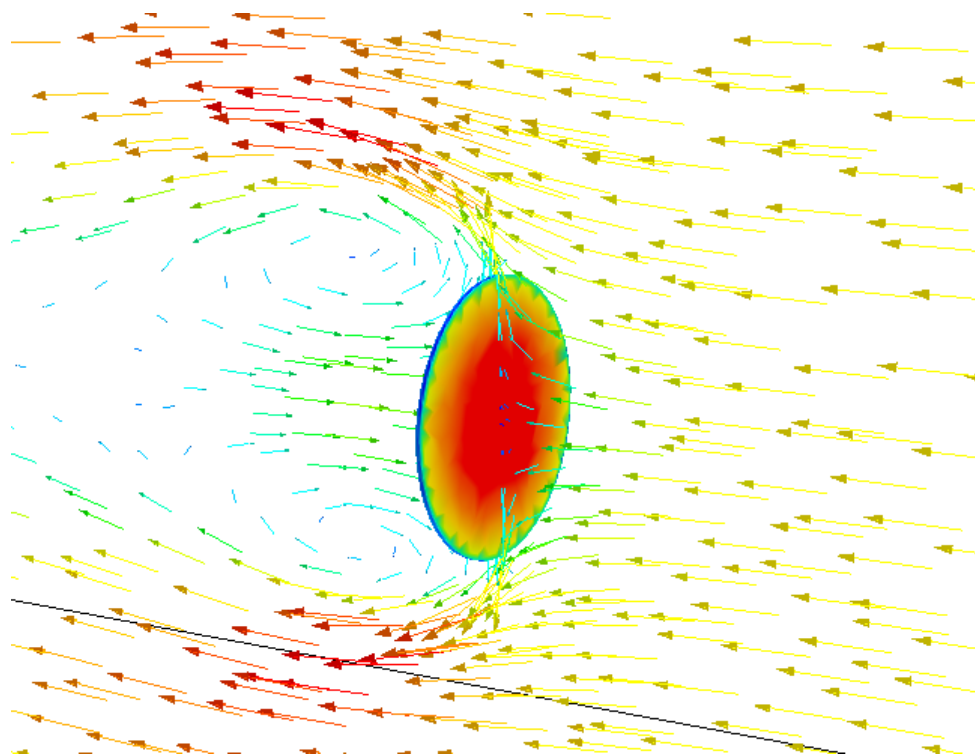
$$\mu = 1,71 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

Pro zvolení odpovídajícího fyzikálního modelu je nutné určit, zda bude proudění laminární nebo turbulentní. K tomu lze využít vztah pro výpočet Reynoldsova čísla (32):

$$Re = \frac{v \cdot \rho_{\text{vzd}} \cdot d}{\mu} = \frac{40 \cdot 1,18 \cdot 1}{1,74 \cdot 10^{-5}} = 271,26 \cdot 10^3$$

$Re \gg Re_{krit} \rightarrow$ proudění je turbulentní

Protože je proudění turbulentní, zvolil jsem fyzikální model turbulentního proudění, výpočet metodou RANS s dvourovnicovým k- ϵ modelem a jako tekutinu jsem zvolil vzduch. Obrázek níže (Obr. 21) znázorňuje rozložení tlakových polí, směr a rychlost částic vzduchu obtékajících kruhovou desku. Hustota vzduchu $\rho_{vzd}=1,18$ odpovídá teplotě 25 °C.



Obr. 21: Obtékání kruhové desky [Autor]

Podle webové stránky NASA by těleso takového tvaru mělo mít hodnotu součinitele odporu vzduchu $C_x=1,28$ [9]. Při simulaci se hodnota součinitele odporu vzduchu ustálila na $C_x=1,31$. Protože rozdíl je téměř zanedbatelný, lze zvolený fyzikální model označit za dostatečně věrohodný s reálnými podmínkami.

5.3.2 Navržený fyzikální model a aerodynamický tunel

3D model se skládá z aerodynamického tunelu a jednotlivých vozidel. Tyto modely jsem vytvořil v software PTC Creo. Pro použití ve STAR-CCM+ bylo nutné modely převést na formát Parasolid (koncovka souboru .x_t)

Umístění soupravy v tunelu:

- Vzdálenost osy nárazníků od podlahy tunelu - 1150 mm
- Vzdálenost předních nárazníků lokomotivy od začátku tunelu - 20 m

Parametry fyzikálního modelu a aerodynamického tunelu:

$$l_{\text{tun}} = 180 \text{ m}$$

$$d_{\text{tun}} = 9 \text{ m}$$

$$v = 25 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\rho_{\text{vzd}} = 1,18 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$p = 101325 \text{ Pa}$$

$$\mu = 1,71 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

Opět je nutné určit, zda bude proudění laminární nebo turbulentní pro výběr optimálního fyzikálního modelu na základě výpočtu Reynoldsova čísla (32):

$$Re = \frac{v \cdot \rho_{\text{vzd}} \cdot d}{\mu} = \frac{25 \cdot 1,18 \cdot 9}{1,74 \cdot 10^{-5}} = 1,52 \cdot 10^6$$

$Re \gg Re_{\text{krit}} \rightarrow$ proudění je turbulentní

Protože fyzikální model zvolený při validaci lze označit jako srovnatelný s reálnými podmínkami a proudění v aerodynamickém tunelu pro modelování aerodynamického působení na železniční vozidla je turbulentní, využil jsem pro další simulace stejný fyzikální model jako při validaci.

5.3.3 Testované soupravy

Všechny modely vozidel jsem podřídil nízké náročnosti výpočtu ve STAR-CCM+, vymodelovány jsou pouze ty části vozidel, které by měly mít na výsledný aerodynamický odpor největší vliv - skříně, sběrače a podvozky s dvojkolím.

Abych porovnal vliv tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor celé soupravy, vytvořil jsem modely lokomotiv řady ČD 163 a ÖBB 1016 (Obr. 22).



Obr. 22: Lokomotivy ÖBB 1016 a ČD 163 [Autor]

Dále jsem vytvořil modely vozů řad Falls, Eas, Zacens a Sggrss. Z lokomotiv a vozů jsem sestavil následující soupravy (Tab. 5),(Příloha 2):

Tab. 5: Seznam souprav

| č. s. | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | 6. vůz | 7. vůz | Ložení (vozy) |
|-------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1 | ÖBB 1016 | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Ložený |
| 2 | ÖBB 1016 | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Prázdný |
| 3 | ÖBB 1016 | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Ložený |
| 4 | ÖBB 1016 | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Prázdný |
| 5 | ÖBB 1016 | Zacens | Zacens | Zacens | Zacens | Zacens | Zacens | Zacens | |
| 6 | ÖBB 1016 | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | | | Ložený |
| 7 | ÖBB 1016 | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | | | (1,2,3) |
| 8 | ÖBB 1016 | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | | | (1,3,5) |
| 9 | ÖBB 1016 | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | | | (3,4,5) |
| 10 | ÖBB 1016 | Falls | Zacens | Sggrss | Eas | Sggrss | | | (4,5) |
| 11 | ČD 163 | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Falls | Ložený |
| 12 | ČD 163 | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Eas | Ložený |
| 13 | ČD 163 | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | Sggrss | | | Ložený |
| 14 | ČD 163 | Falls | Zacens | Sggrss | Eas | Sggrss | | | (4,5) |

6 Modelování a posouzení vlivu tvaru, řazení a naložení nákladních vozů na aerodynamické vlastnosti vlaku

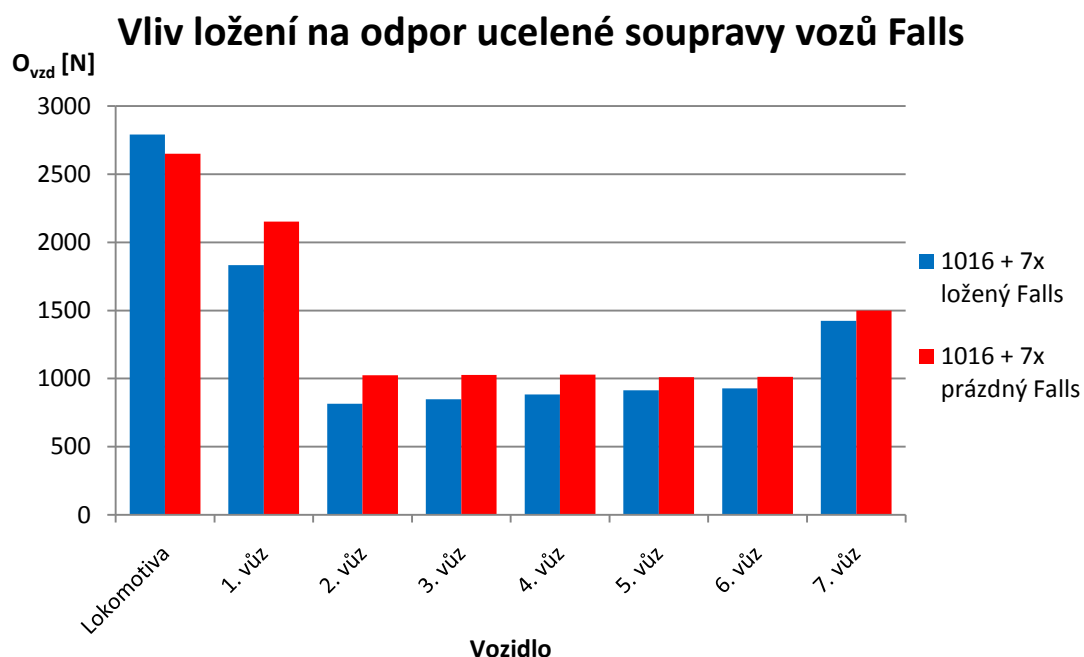
Na navržených soupravách jsem modelováním proudění vzduchu v CFD software STAR-CCM+ simuloval aerodynamický odpor při jízdě rychlostí 25 m.s^{-1} (90 km.h^{-1}). Výsledky jsem porovnával mezi ucelenými soupravami se stejnými vozy (loženými i prázdnými) nebo se stejným řazením nákladních vozů.

6.1 Soupravy s vozy Falls

Pro ucelenou soupravu s vozy Falls jsem zjišťoval vliv ložení (soupravy č. 1 a 2) a tvaru lokomotivy (soupravy č. 1 a 11) na aerodynamický odpor soupravy. Dále jsem zjišťoval přírůstek aerodynamického odporu prvního a posledního vozu v soupravě. Výsledky simulací jsou v tabulce (Tab. 6). Celková čelní plocha S není součtem všech čelních ploch vozidel, ale jedná se o čelní plochu vlaku jako jednoho celku. Podobně je to i u tvarového součinitele odporu vzduchu C_x .

Tab. 6: Výsledky simulace se soupravami s vozy Falls

| | | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | 6. vůz | 7. vůz | Celkově |
|----------------|---------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Souprava č. 1 | $S [\text{m}^2]$ | 11,08 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 11,58 |
| | $C_x [-]$ | 0,68 | 0,48 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,24 | 0,24 | 0,37 | 2,444 |
| | $O_{vz} [\text{N}]$ | 2792 | 1831 | 815 | 849 | 883 | 913 | 929 | 1423 | 10436 |
| Souprava č. 2 | $S [\text{m}^2]$ | 11,08 | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 11,55 |
| | $C_x [-]$ | 0,65 | 0,57 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,40 | 2,678 |
| | $O_{vz} [\text{N}]$ | 2651 | 2151 | 1025 | 1027 | 1030 | 1010 | 1012 | 1499 | 11404 |
| Souprava č. 11 | $S [\text{m}^2]$ | 11,73 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 11,84 |
| | $C_x [-]$ | 0,96 | 0,41 | 0,24 | 0,26 | 0,27 | 0,27 | 0,28 | 0,33 | 2,768 |
| | $O_{vz} [\text{N}]$ | 4174 | 1569 | 927 | 1006 | 1040 | 1038 | 1058 | 1275 | 12087 |

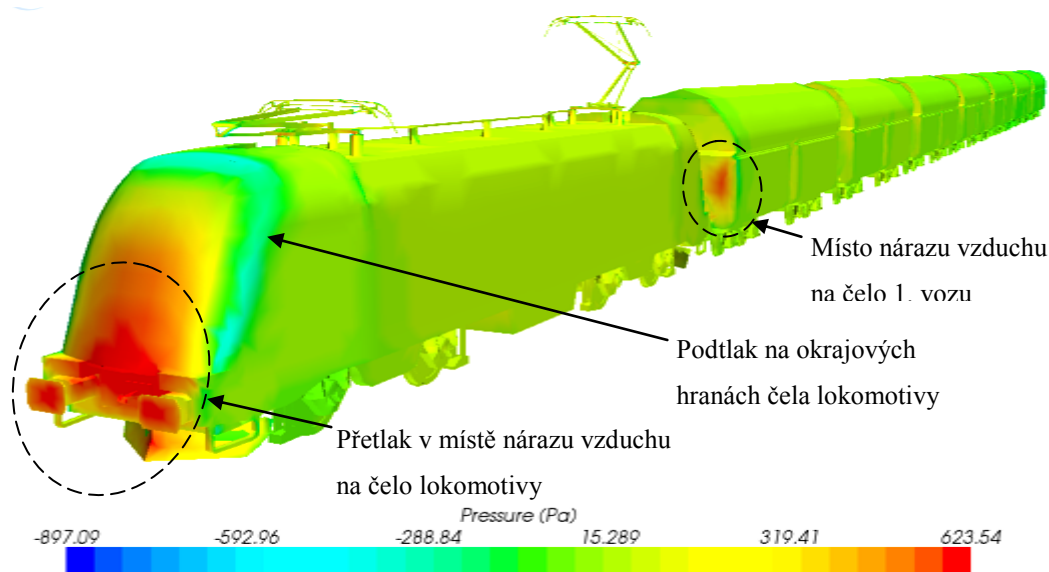


Obr. 23: Graf vlivu ložení na aerodynamický odpor ucelené soupravy vozů Falls

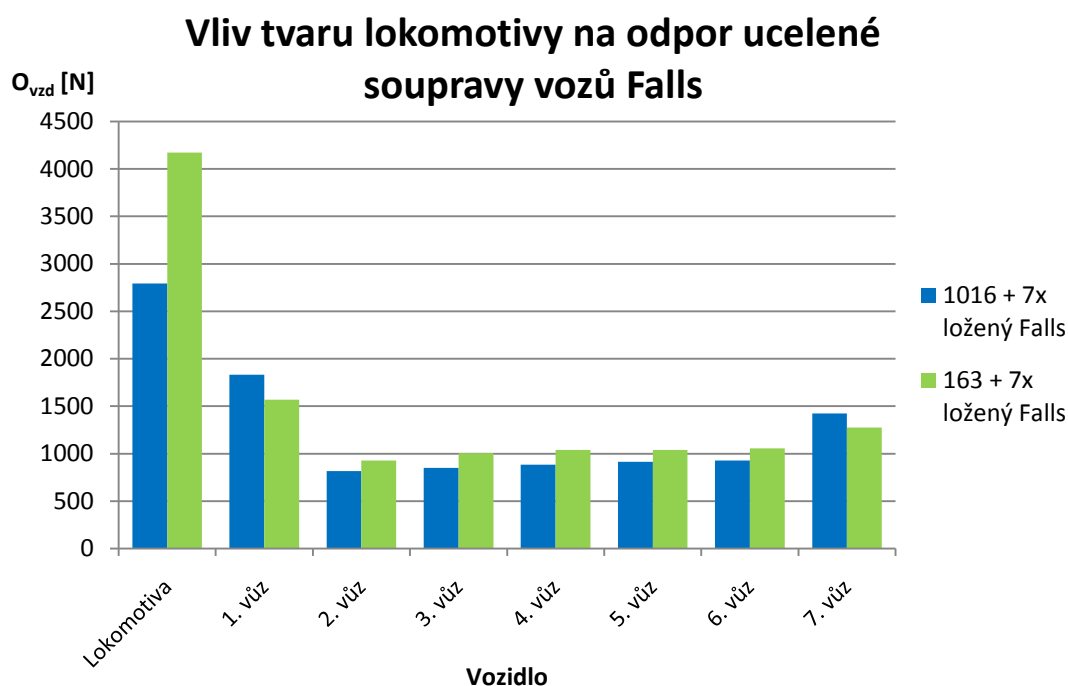
[Autor]

Podle grafu (Obr. 23) porovnávajícího odpor ložených a prázdných vozů lze usoudit, že ložení u vozů tohoto typu nemá významný vliv na jejich aerodynamický odpor. Nejvyšší aerodynamický odpor musí překonat lokomotiva, u vozů uvnitř soupravy je odpor nejmenší a ustálený na přibližně stejné hodnotě. Za koncovým vozem vzniká podtlak a jeho odpor je proto o něco větší. Přesto, že lokomotiva na čele vlaku působí jako "větrný štít", relativně vysokým odporem vzduchu se vyznačuje i první vůz soupravy.

Pro názornost je níže uveden obrázek ze simulace (Obr. 24) s rozložením tlakových polí (tlak na ploše vytváří sílu - aerodynamický odpor). Protože lokomotiva má relativně aerodynamický tvar, vzduch těsně obtéká zadní čelo lokomotivy, kde přímo naráží do čela prvního vozu (červená ploška). V prostoru mezi zadním čelem lokomotivy a čelem prvního vozu se vytváří přetlak, který snižuje aerodynamický odpor lokomotivy ale zároveň zvyšuje odpor prvního vozu.



Obr. 24: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 1 s vozy Falls [Autor]



Obr. 25: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor ucelené soupravy ložených vozů Falls [Autor]

Z grafu (Obr. 25) je patrné, že pokud lokomotiva nemá aerodynamický tvar (ČD 163), mírně se sníží odpor 1. vozu. Celkově je ale aerodynamický odpor vlaku větší, právě vlivem tvaru lokomotivy v čele soupravy.

Dále jsem určil nárůst aerodynamického odporu prvního a koncového vozu soupravy oproti průměrnému odporu ostatních vozů uvnitř soupravy (průměrná hodnota odporu 2.- 6. vozu).

Tab. 7: Průměrné hodnoty odporů vozů uvnitř soupravy a odpory 1. a posledního vozu

| | $\overline{O_{vz}}$ [N] | O_{vz1} [N] | O_{vzk} [N] |
|-----------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Souprava č. 1 | 878 | 1831 | 1423 |
| Souprava č. 2 | 1021 | 2151 | 1499 |
| Souprava č. 11 | 1014 | 1569 | 1275 |

kde:

- $\overline{O_{vz}}$ [N] - průměrný aerodynamický odpor vozů uvnitř soupravy
- O_{vz1} [N] - aerodynamický odpor 1. vozu
- O_{vzk} [N] - aerodynamický odpor koncového vozu

K výpočtu nárůstu odporu prvního a koncového vozu soupravy jsem zavedl součinitele nárůstu aerodynamického odporu α_o a β_o . Způsob jejich výpočtu popisují následující vztahy (37, 38):

$$\alpha_o = \frac{O_{vz1}}{\overline{O_{vz}}} \quad [-] \quad (37)$$

$$\beta_o = \frac{O_{vzk}}{\overline{O_{vz}}} \quad [-] \quad (38)$$

kde:

- α_o [-] - součinitel nárůstu aerodynamického odporu prvního vozu
- β_o [-] - součinitel nárůstu aerodynamického odporu koncového vozu

Vzorový výpočet součinitelů α_o a β_o pro soupravu č. 1:

$$\alpha_o = \frac{O_{vz1}}{\overline{O_{vz}}} = \frac{1831}{878} = 2,09$$

$$\beta_o = \frac{O_{vzk}}{\overline{O_{vz}}} = \frac{1423}{878} = 1,62$$

Tab. 8: Přehled součinitelů α_o a β_o pro soupravy s vozy Falls

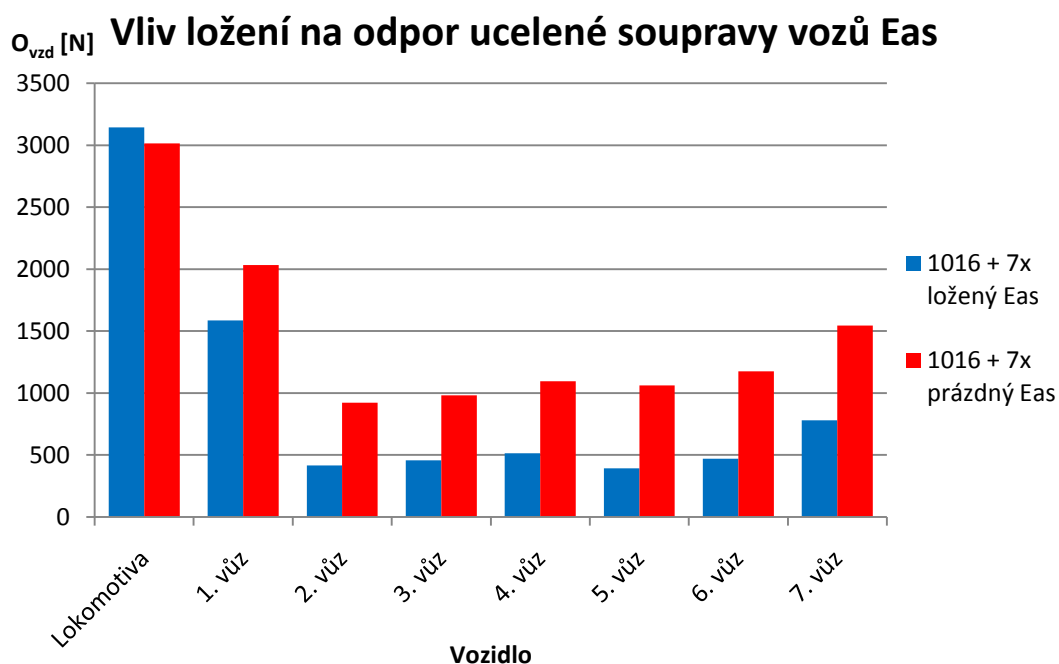
| | α_o [-] | β_o [-] |
|-----------------------|----------------|---------------|
| Souprava č. 1 | 2,09 | 1,62 |
| Souprava č. 2 | 2,11 | 1,47 |
| Souprava č. 11 | 1,55 | 1,26 |

6.2 Soupravy s vozy Eas

Podobně jako v bodě 6.1 jsem zjišťoval vliv ložení (soupravy č. 3 a 4) a tvaru lokomotivy (soupravy č. 3 a 12) na aerodynamický odpor soupravy.

Tab. 9: Výsledky simulace se soupravami s vozy Eas

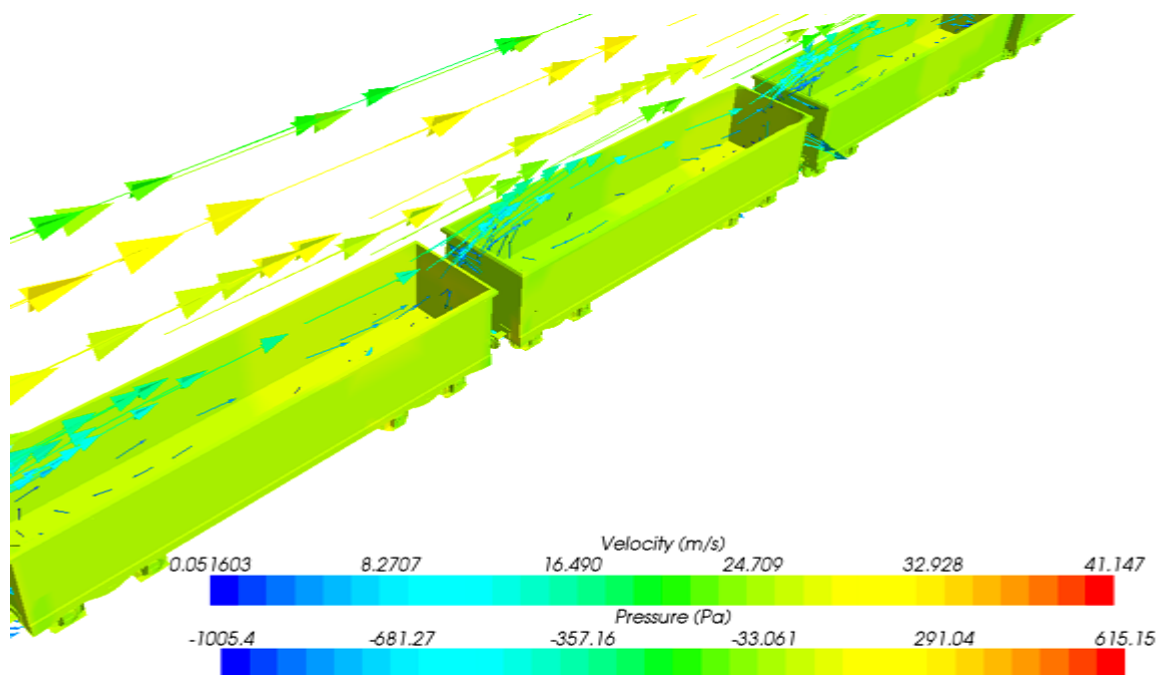
| | | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | 6. vůz | 7. vůz | Celkově |
|----------------|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Souprava č. 3 | $S [m^2]$ | 11,08 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 11,15 |
| | $C_x [-]$ | 0,77 | 0,54 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,13 | 0,16 | 0,26 | 1,89 |
| | $O_{vz} [N]$ | 3143 | 1587 | 416 | 456 | 514 | 392 | 471 | 780 | 7758 |
| Souprava č. 4 | $S [m^2]$ | 11,08 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 11,15 |
| | $C_x [-]$ | 0,74 | 0,70 | 0,32 | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,40 | 0,53 | 2,88 |
| | $O_{vz} [N]$ | 3014 | 2034 | 922 | 982 | 1094 | 1062 | 1176 | 1545 | 11828 |
| Souprava č. 12 | $S [m^2]$ | 11,73 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 11,77 |
| | $C_x [-]$ | 0,95 | 0,21 | 0,12 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,15 | 0,27 | 1,76 |
| | $O_{vz} [N]$ | 4117 | 607 | 364 | 445 | 431 | 415 | 454 | 794 | 7627 |



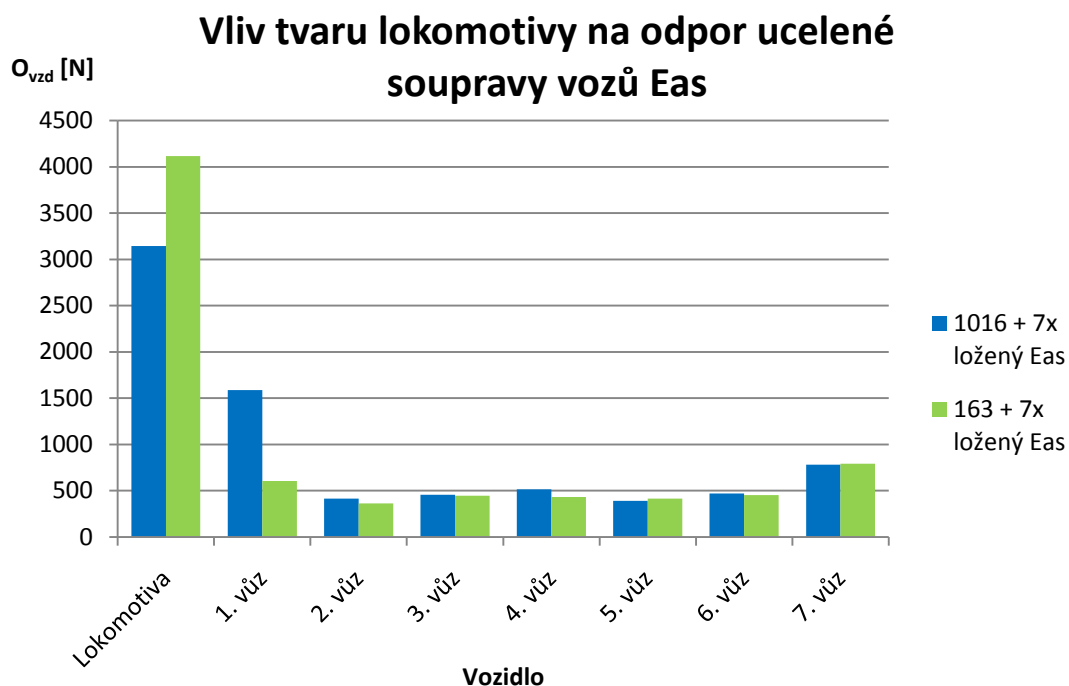
Obr. 26: Graf vlivu ložení na aerodynamický odpor ucelené soupravy vozů Eas [Autor]

Zde už je rozdíl v aerodynamickém odporu mezi loženými a prázdnými vozy lépe viditelný (Obr. 26), v některých případech je odpor prázdných vozů více než dvojnásobný oproti loženým vozům. Je to dáno zejména tvarem samotných vozů - ložný prostor vozu Eas je více otevřený než u vozu Falls. Na obrázku (Obr. 27) je

viditelné víření vzduchu v prázdném voze a "přeskakování" vzduchu mezi vozy (šipky znázorňují směr a rychlost proudícího vzduchu).



Obr. 27: Víření vzduchu v prázdných vozech typu Eas [Autor]



Obr. 28: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor ucelené soupravy ložených vozů Eas [Autor]

Podobně jako u soupravy v bodě 6.1 se použitím lokomotivy řady 163 sníží aerodynamický odpor prvního vozu, v tomto případě výrazněji než u soupravy s

vozy Falls. Podle výsledků simulace má souprava s lokomotivou řady 163 nižší i celkový aerodynamický odpor, proti soupravě s lokomotivou ÖBB 1016.

Tab. 10: Průměrné hodnoty odporů vozů uvnitř soupravy a odpory 1. a posledního vozu soupravy

| | \overline{O}_{vz} [N] | O_{vz1} [N] | O_{vzk} [N] |
|-----------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Souprava č. 3 | 450 | 1587 | 780 |
| Souprava č. 4 | 1047 | 2034 | 1545 |
| Souprava č. 12 | 422 | 607 | 794 |

Výpočet součinitelů α_o a β_o je obdobný jako v bodě 6.1 (37, 38). Výsledky výpočtů jsou v tabulce níže (Tab. 11):

Tab. 11: Přehled součinitelů α_o a β_o pro soupravy s vozy Eas

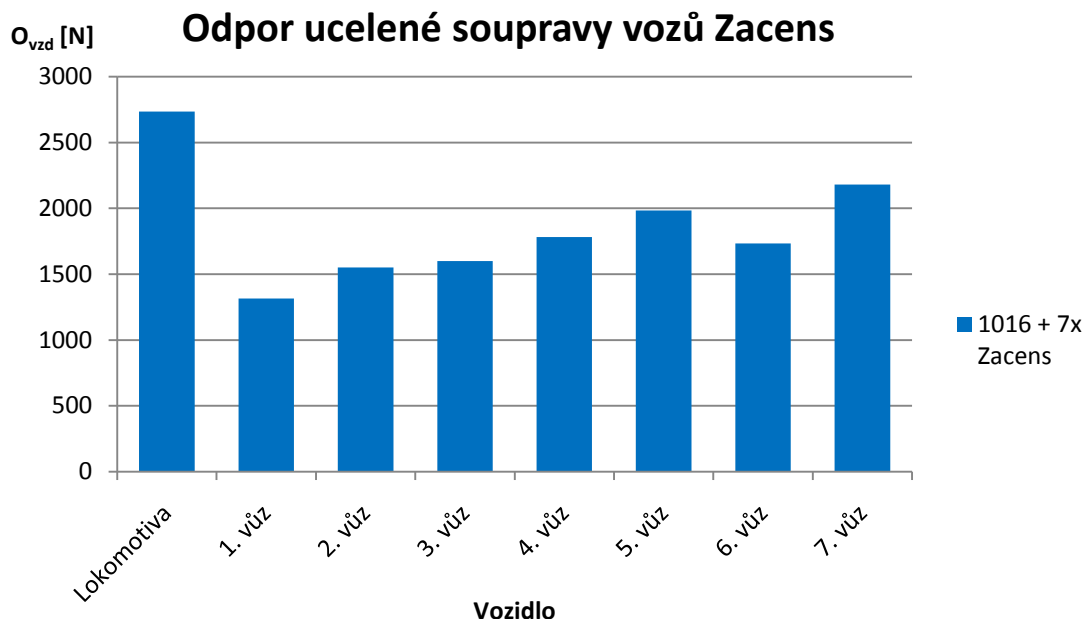
| | α_o [-] | β_o [-] |
|-----------------------|----------------|---------------|
| Souprava č. 3 | 3,53 | 1,73 |
| Souprava č. 4 | 1,94 | 1,48 |
| Souprava č. 12 | 1,44 | 1,88 |

6.3 Souprava s vozy Zacens

Na rozdíl od předchozích simulací, u soupravy vozů Zacens jsem zjišťoval pouze aerodynamický odpor vozů s jedním typem lokomotivy. Ložení nemá u těchto vozů na aerodynamický odpor žádný vliv, jelikož se jedná o kotlové vozy - ložný prostor je tedy zcela zakrytý.

Tab. 12: Výsledky simulace se soupravami s vozy Zacens

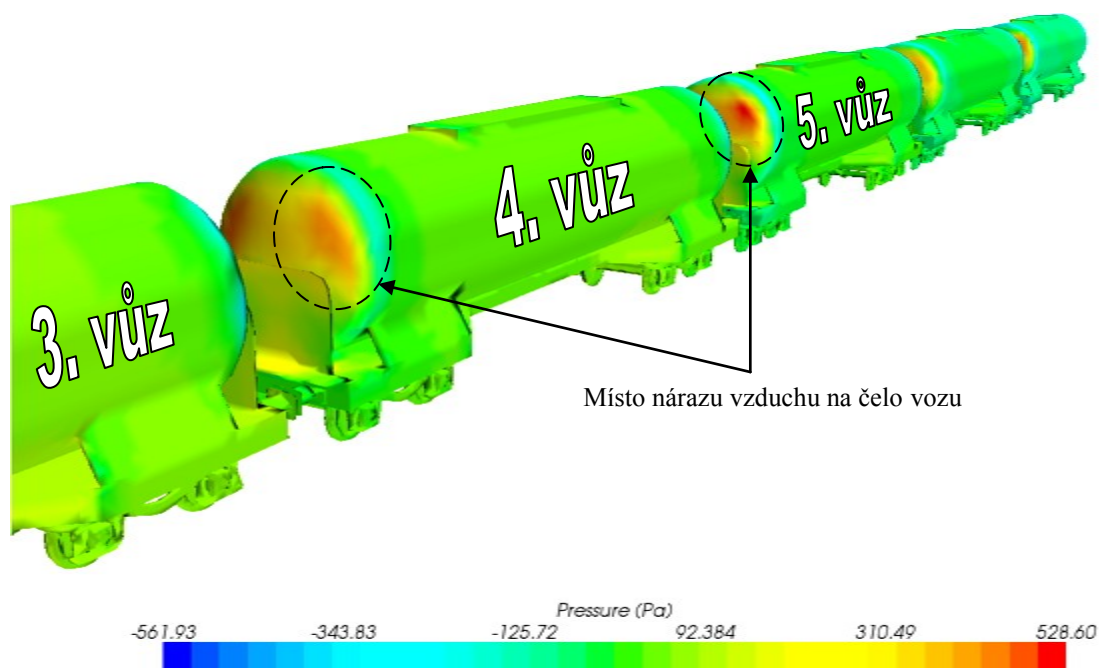
| | | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | 6. vůz | 7. vůz | Celkové |
|----------------------|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Souprava č. 5 | $S [m^2]$ | 11,08 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 9,9 | 11,46 |
| | $C_x [-]$ | 0,67 | 0,36 | 0,42 | 0,44 | 0,49 | 0,54 | 0,48 | 0,60 | 3,522 |
| | $O_{vz} [N]$ | 2734 | 1315 | 1551 | 1600 | 1782 | 1983 | 1734 | 2180 | 14878 |



Obr. 29: Graf aerodynamického odporu ucelené soupravy vozů Zacens [Autor]

Na rozdíl od předchozích simulací není odpor vozů řazených uvnitř soupravy ustálený, v grafu (Obr. 29) jsou patrné rozdíly v odporu mezi jednotlivými vozy. Možnou variantou je, že při použití delší soupravy by došlo k ustálení aerodynamického odporu vložených vozů, při pokusu o modelování proudění v delším tunelu s více vozy nebyl výpočet konvergentní a nebylo možné tuto variantu ověřit. Jiný odpor má i první vůz, který měl při předchozích simulacích vždy větší aerodynamický odpor, než byl průměrný odpor vozů uvnitř soupravy.

Důvodem, proč aerodynamický odpor těchto vozů v závislosti na pozici v soupravě není podobný jako u předchozích simulací, může být tvar těchto vozů. Jejich tvar je relativně aerodynamický, čelo nástavby má jednak kruhový průřez a navíc je na okrajích zaobleno. V podstatě se jedná o stejný důvod, proč má vůz za lokomotivou řady 1016 s aerodynamickým čelem větší aerodynamický odpor, než kdyby byl řazen za lokomotivou řady 163, která aerodynamické čelo nemá. Obtékající vzduch kopíruje zaoblené hrany kotlové nástavby vozu a poté proudí přímo na čelo dalšího vozu. Na následujícím obrázku (Obr. 30) je opět jako v bodě 6.1 viditelná červená ploška, kde vzduch naráží do čela vozu. Tato ploška je největší na čele 5. vozu, tento vůz má také největší aerodynamický odpor ze všech vozů řazených uvnitř soupravy.



Obr. 30: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 5 s vozy Zacens [Autor]

Protože nebylo dosaženo ustálené hodnoty aerodynamického odporu vozů řazených uvnitř soupravy, není vhodné počítat nárůst aerodynamického odporu prvního a koncového vozu oproti průměrné hodnotě odporu vozů uvnitř soupravy. Pro lepší posouzení aerodynamického odporu soupravy kotlových vozů Zacens by bylo nutné provést přepočítání modelu s více zařazenými vozy v jiném software.

6.4 Souprava s vozy Sggrss

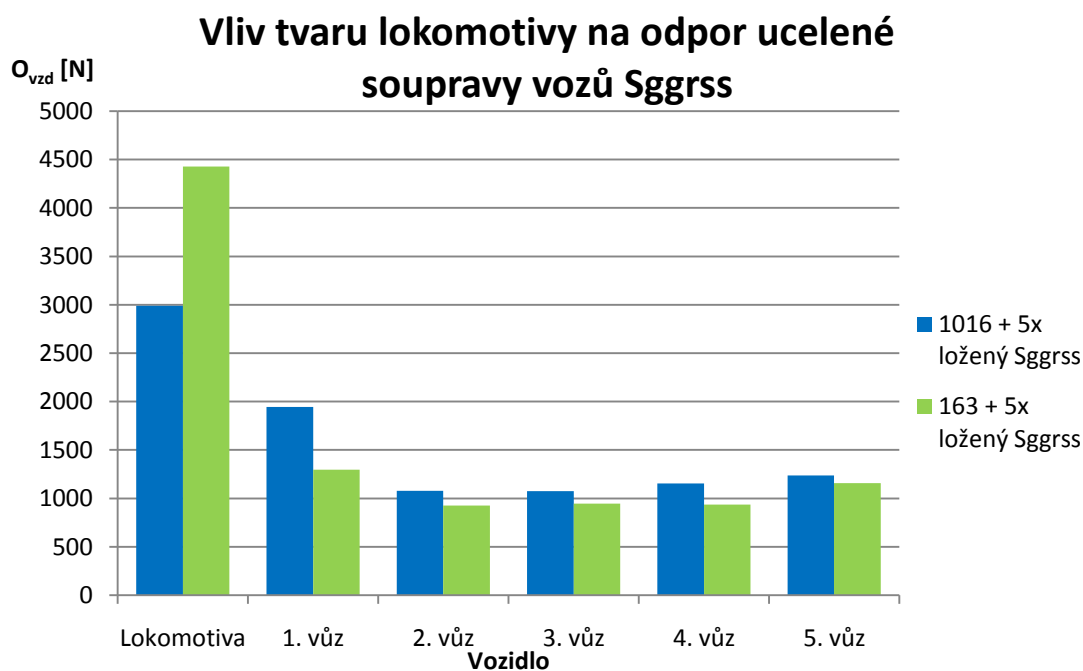
Vozy Sggrss jsou na rozdíl od ostatních použitých vozů šestnápravové, skládají se ze dvou samostatných rámců, které jsou otočně spojené nad prostředním podvozkem. Tyto vozy slouží pro přepravu ISO kontejnerů.

Kontejnerové vlaky jsou obvykle vedeny jako Nex (nákladní expres), mají na železniční síti nejvyšší prioritu mezi nákladními vlaky a také obvykle dosahují vyšších dopravních rychlostí než ostatní nákladní vlaky. S rostoucí rychlostí ale také narůstá aerodynamický odpor vlaku a spotřeba energie. Proto jsem pro soupravu s těmito vozy provedl více simulací, které byly zaměřeny na posouzení velikosti aerodynamického odporu v závislosti na rozložení naložených kontejnerů na těchto vozech. Ze simulací jsem vypustil ucelenou soupravu prázdných vozů, jelikož v praxi bývají vozy v těchto soupravách zpravidla z větší části naložené kontejnery.

Tab. 13: Výsledky simulace se soupravami s vozy Sggrss

| | | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | Celkově |
|-----------------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Souprava č. 6 | $S [m^2]$ | 11,08 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 11,13 |
| | $C_x [-]$ | 0,73 | 0,62 | 0,35 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 2,31 |
| | $O_{vz} [N]$ | 2991 | 1944 | 1080 | 1074 | 1154 | 1237 | 9479 |
| Souprava č. 7 | $S [m^2]$ | 11,08 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 2,19 | 2,19 | 11,13 |
| | $C_x [-]$ | 0,74 | 0,62 | 0,35 | 0,30 | 0,59 | 0,67 | 1,95 |
| | $O_{vz} [N]$ | 3012 | 1939 | 1097 | 941 | 477 | 541 | 8007 |
| Souprava č. 8 | $S [m^2]$ | 11,08 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 11,13 |
| | $C_x [-]$ | 0,75 | 1,12 | 0,57 | 0,66 | 0,67 | 0,71 | 3,56 |
| | $O_{vz} [N]$ | 3071 | 3489 | 1770 | 2059 | 2098 | 2219 | 14706 |
| Souprava č. 9 | $S [m^2]$ | 11,08 | 2,19 | 2,19 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 11,13 |
| | $C_x [-]$ | 0,76 | 0,99 | 0,67 | 1,00 | 0,30 | 0,35 | 2,32 |
| | $O_{vz} [N]$ | 3118 | 797 | 546 | 3123 | 937 | 1079 | 9600 |
| Souprava č. 13 | $S [m^2]$ | 11,73 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 8,48 | 11,73 |
| | $C_x [-]$ | 1,02 | 0,41 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,37 | 2,24 |
| | $O_{vz} [N]$ | 4429 | 1295 | 927 | 947 | 934 | 1158 | 9690 |

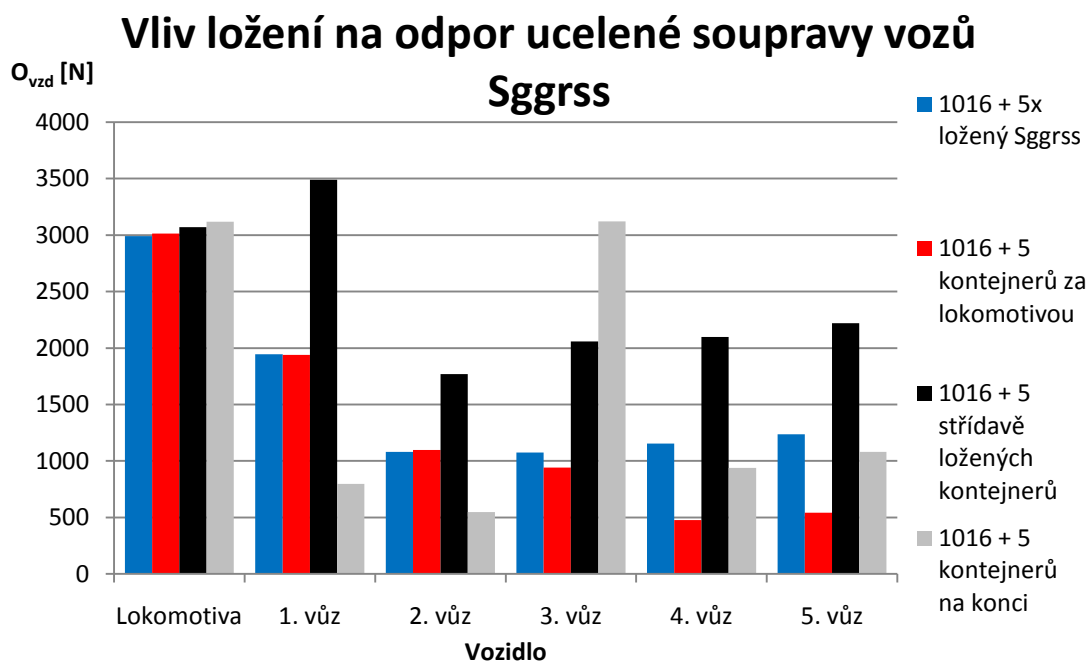
Podobně, jako u souprav ostatních vozů, jsem porovnával vliv tvaru lokomotivy na odpor vlaku s loženými vozy (soupravy č. 6 a 13)



Obr. 31: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor ucelené soupravy ložených vozů Sggrss

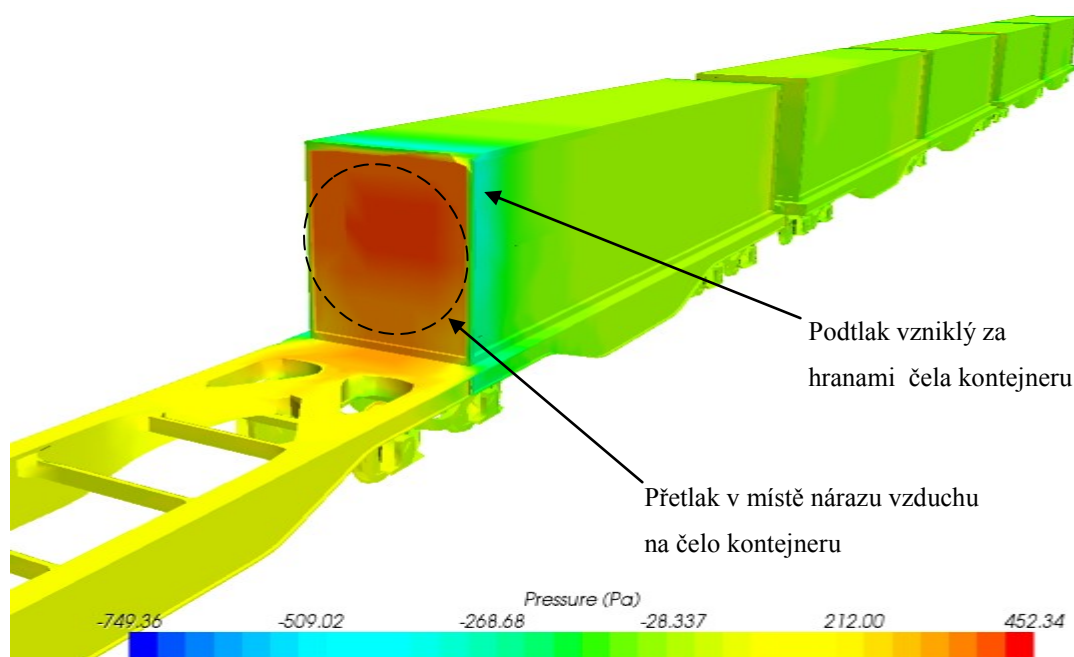
Na grafu (Obr. 31) lze opět dobře vidět rozdíl v aerodynamickém odporu lokomotivy v čele vlaku, kde lokomotiva řady 163 musí překonat znatelně větší odpor než lokomotiva ÖBB 1016. Odpor prvního vozu je opět v soupravě s lokomotivou řady 163 znatelně menší, než odpor prvního vozu řazeného za lokomotivou ÖBB 1016, menší odpor mají i vozy řazené uvnitř soupravy. Celkový aerodynamický odpor je mírně vyšší u soupravy s lokomotivou řady 163.

V závislosti na ložení jsem porovnával soupravu plně naloženou kontejnery (10 kontejnerů) a soupravy s 5-ti kontejnery, kde byly kontejnery na vozech různě uspořádány. Porovnat výsledky lze na grafu níže (Obr. 32)



Obr. 32: Graf vlivu ložení na aerodynamický odpor ucelené soupravy vozů Sggrss
[Autor]

Největší odpor vzduchu musí překonat souprava č. 8, kde jsou kontejnery loženy střídavě, první vůz této soupravy má dokonce větší odpor než lokomotiva. Je to způsobeno tím, že se proudící vzduch se dostává do prázdného prostoru za kontejnerem, na čelo následujícího kontejneru poté působí větší dynamický tlak, než v případě souvisle ložených kontejnerů. Zvýšený tlak na čelní ploše kontejneru za prázdným místem vozu je dobře viditelný na obrázku níže (Obr. 33).



Obr. 33: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 9 s vozy Sggrss [Autor]

U soupravy č. 7 aerodynamický odpor postupně klesá a je zároveň nejmenší ze všech souprav s vozy Sggrss. První vůz má přibližně stejný odpor, jako u plně ložené soupravy. Odpor 3. vozu je o něco nižší než u soupravy č. 6, to může být způsobeno chybějícím kontejnerem v druhé části vozu. Odpor prázdných vozů je již mnohem menší než u vozů ložených.

Souprava č. 9 má přibližně stejný celkový aerodynamický odpor jako plně ložená souprava. První dva vozy mají relativně malý odpor, protože jsou prázdné. Odpor skokem narostl u 3. vozu, kde byl v jeho zadní části naložen první kontejner, na jehož čelo proudí velké množství vzduchu (viz. Obr. 33).

Podobně jako u souprav s vozy Falls a Eas jsem určil nárůst aerodynamického odporu prvního a koncového vozu za použití vztahů (37, 38). Výsledky jsou v tabulkách níže (Tab. 14, Tab. 15)

Tab. 14: Průměrné hodnoty odporů vozů uvnitř soupravy a odpory 1. a posledního vozu soupravy

| | \overline{O}_{vz} [N] | O_{vz1} [N] | O_{vzk} [N] |
|-----------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Souprava č. 6 | 1012 | 1944 | 1237 |
| Souprava č. 8 | 1976 | 3489 | 2219 |
| Souprava č. 13 | 936 | 1294 | 1158 |

Tab. 15: Přehled součinitelů α_o a β_o pro soupravy s vozy Sggrss

| | α_o [-] | β_o [-] |
|-----------------------|----------------|---------------|
| Souprava č. 6 | 1,76 | 1,12 |
| Souprava č. 8 | 1,77 | 1,12 |
| Souprava č. 13 | 1,38 | 1,24 |

U souprav s lokomotivou ÖBB 1016 jsou součinitele α_o a β_o téměř stejné. U soupravy s lokomotivou 163 je součinitel α_o znatelně menší, β_o je o něco větší - to může být způsobeno nižším odporem vozů řazených uvnitř soupravy, absolutní velikost odporu koncového vozu se u obou plně ložených souprav příliš neliší.

Abych mohl porovnat zvýšení odporu částečně loženého vozu oproti loženému vozu číselně, zavedl jsem součinitel γ_o , který bude znázorňovat zvýšení aerodynamického odporu vozu vlivem tvarové nesouvislosti jednoho vozu i celé

soupravy, kdy se skokově významně mění velikost čelního průřezu vozu v celé jeho délce vlivem částečného ložení vozu a čelní plocha celého vozu S_x je stejná jako u loženého vozu.

Výpočet součinitele γ_o :

$$\gamma_o = \frac{\overline{O_{vzL}}}{\overline{O_{vzS}}} [-] \quad (39)$$

kde:

- γ_o [-] - součinitel nárůstu aerodynamického odporu vlivem tvarové nesouvislosti
- $\overline{O_{vzL}}$ [N] - průměrný aerodynamický odpor ložených vozů uvnitř soupravy
- $\overline{O_{vzS}}$ [N] - průměrný aerodynamický odpor částečně (střídavě) ložených vozů uvnitř soupravy

$$\gamma_o = \frac{\overline{O_{vzS}}}{\overline{O_{vzL}}} = \frac{1976}{1102} = 1,79$$

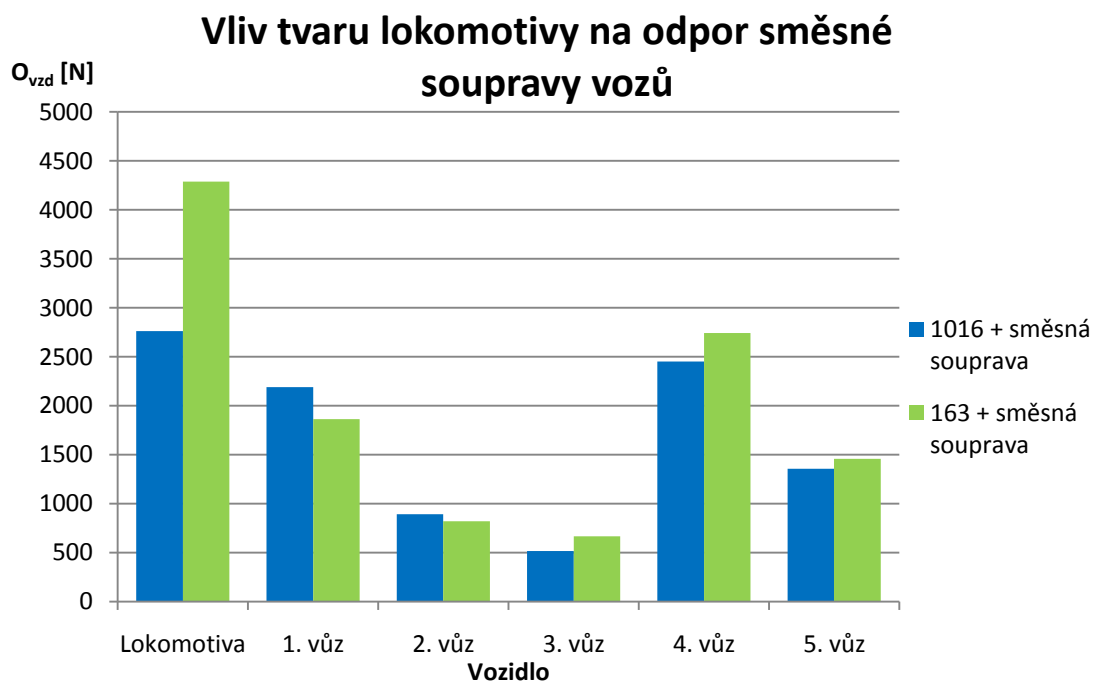
Podle výsledku lze tedy předpokládat, že oproti plně loženým vozům bude odpor částečně ložených vozů přibližně o 79% vyšší.

6.5 Směsná souprava

U směsné soupravy jsem podobně jako v předchozích simulacích porovnával vliv tvaru lokomotivy na celkový odpor vlaku. Dále jsem podobně jako u soupravy č. 8 určil součinitel γ_o , kterým jsem určil nárůst odporů vozů v simulaci směsné soupravy oproti odporům vozů v ucelených soupravách.

Tab. 16: Výsledky simulace se směsnou soupravou

| | | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | 6. vůz | 7. vůz | Celkové |
|----------------|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Souprava č. 10 | $S [m^2]$ | 11,08 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 11,15 |
| | $C_x [-]$ | 0,77 | 0,54 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,13 | 0,16 | 0,26 | 1,89 |
| | $O_{vz} [N]$ | 3143 | 1587 | 416 | 456 | 514 | 392 | 471 | 780 | 7758 |
| Souprava č. 14 | $S [m^2]$ | 11,08 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 11,15 |
| | $C_x [-]$ | 0,74 | 0,70 | 0,32 | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,40 | 0,53 | 2,88 |
| | $O_{vz} [N]$ | 3014 | 2034 | 922 | 982 | 1094 | 1062 | 1176 | 1545 | 11828 |



Obr. 34: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor směsné soupravy [Autor]

V grafu (Obr. 34) je opět dobře vidět značně vyšší aerodynamický odpor lokomotivy řady 163 a podobně jako v předchozích případech má první vůz za touto lokomotivou menší odpor než za lokomotivou ÖBB 1016. Odpory ostatních vozů jsou u obou souprav přibližně stejné.

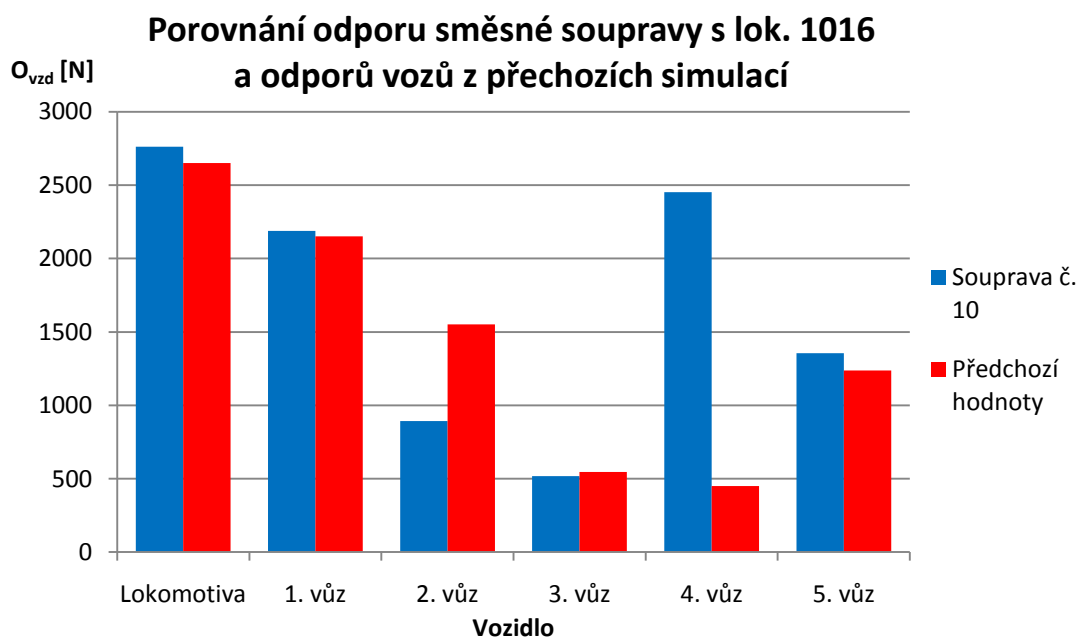
Z předchozích simulací jsem převzal hodnoty odporů vozů a lokomotiv pro porovnání s hodnotami simulace se směsnou soupravou (Tab. 17, 18).

Tab. 17: Aerodynamický odpor směsné soupravy s lokomotivou ÖBB 1016

| | | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | Celkově |
|------------------------|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Souprava č. 10 | O_{vz} [N] | 2763 | 2188 | 893 | 516 | 2452 | 1355 | 10166 |
| Z předchozích simulací | O_{vz} [N] | 2651 | 2151 | 1551 | 546 | 450 | 1237 | 8585 |

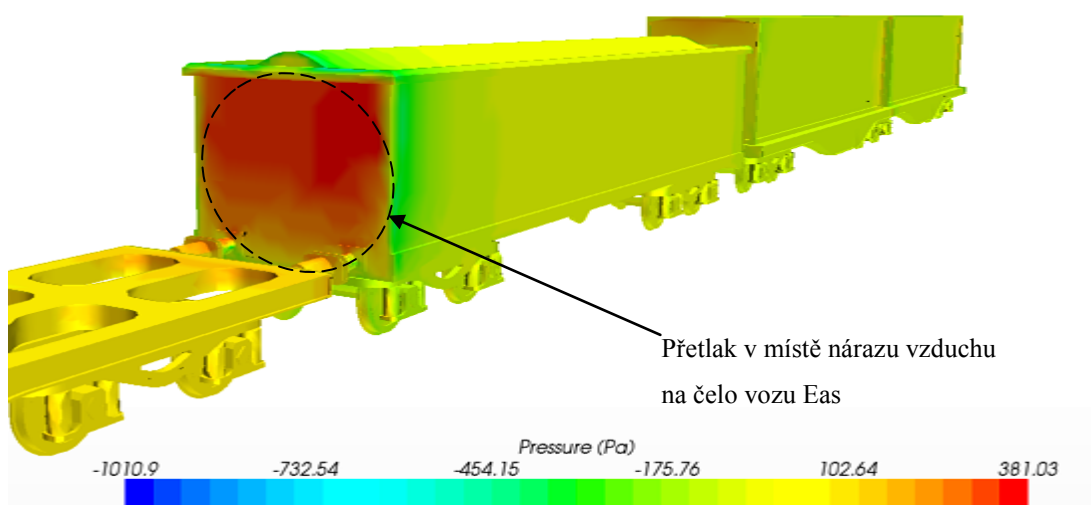
Tab. 18: Aerodynamický odpor směsné soupravy s lokomotivou ČD 163

| | | Lokomotiva | 1. vůz | 2. vůz | 3. vůz | 4. vůz | 5. vůz | Celkově |
|------------------------|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Souprava č. 14 | O_{vz} [N] | 4288 | 1861 | 820 | 668 | 2743 | 1457 | 11838 |
| Z předchozích simulací | O_{vz} [N] | 4171 | 1669 | 1551 | 546 | 422 | 1158 | 9517 |



Obr. 35: Grafické porovnání odporu vozů soupravy č. 10 a hodnot odporů z předchozích simulací [Autor]

Z výše uvedeného grafu (Obr. 35) lze usoudit, že aerodynamický odpor lokomotivy je přibližně stejný jako u předchozích simulací, podobně je tomu i u prvního vozu za lokomotivou, ostatní odpory se ale již liší. U 2. vozu je odpor menší, protože vůz Falls lépe kryje čelo vozu Zacens. U 4. vozu je viditelný prudký nárůst odporu, protože čelo vozu je z větší části odkryté (Obr. 36).



Obr. 36: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 10 [Autor]

Podobně jako v bodě 6.4 jsem vyjádřil poměrovou změnu odporu vozů, nyní ale ne v závislosti na střídavém ložení, ale v závislosti na různém řazení. Tato změna je opět vyjádřena pomocí součinitele γ_o , který bude v tomto případě reprezentovat změnu odporu vlivem tvarové nesouvislosti jednotlivých vozů zařazených do soupravy.

$$\gamma_o = \frac{\sum_i O_{vzSi}}{\sum_i O_{vzi}} \quad [-] \quad (40)$$

kde:

- O_{vzi} [N] - aerodynamický odpor i-tého vozu uvnitř ucelené soupravy (hodnoty z předchozích simulací)
- O_{vzSi} [N] - aerodynamický odpor i-tého vozu uvnitř směsné soupravy

Výpočet γ_o pro soupravu s lokomotivou ÖBB 1016:

$$\gamma_o = \frac{\sum_i O_{vzSi}}{\sum_i O_{vzi}} = \frac{893 + 516 + 2452}{1551 + 546 + 450} = \frac{3861}{2547} = 1,52$$

Výpočet γ_o pro soupravu s lokomotivou ČD 163:

$$\gamma_o = \frac{\sum_i O_{vzSi}}{\sum_i O_{vzi}} = \frac{820 + 668 + 2743}{1551 + 546 + 422} = \frac{4231}{2519} = 1,68$$

Protože jsem hodnoty odporů vozů Zacens a prázdného Sggrss převzal ze simulací s lokomotivou ÖBB 1016, je hodnota γ_o pro soupravu s lokomotivou řady 163 pouze orientační. Při změně vozů řazených v soupravě se bude měnit i hodnota součinitele γ_o .

6.6 Shrnutí

Výsledky jednotlivých hodnot, charakteristických pro vybrané vozy a lokomotivy jsou popsány v tabulce níže (Tab. 19). Hodnoty C_x pro vozy jsem získal průměrem hodnot ze simulací s oběma lokomotivami. C_x pro lokomotivy jsem získal průměrem ze všech simulací. Neznámé hodnoty součinitelů α_o a β_o mají hodnotu 1.

Tab. 19: Charakteristické hodnoty pro výpočet aerodynamického odporu vybraných vozidel *

| Vozidlo | $S_x^\circ [m^2]$ | $S_x [m^2]$ | $C_x^\circ [-]$ | $C_x [-]$ | $\alpha_o [-]$ | $\alpha_o^\circ [-]$ | $\alpha_{oN} [-]$ | $\beta_o^\circ [-]$ | $\beta_o [-]$ | $\gamma_o [-]$ |
|-----------------|-------------------|-------------|-----------------|-----------|----------------|----------------------|-------------------|---------------------|---------------|----------------|
| ČD 163 | 11,73 | 11,73 | 0,98 | 0,98 | - | - | - | - | - | 1,68 |
| ÖBB 1016 | 11,08 | 11,08 | 0,74 | 0,74 | - | - | - | - | - | 1,52 |
| Falls | 10,2 | 10,4 | 0,27 | 0,23 | 2,09 | 2,11 | 1,22 | 1,47 | 1,44 | - |
| Eas | 7,9 | 8 | 0,36 | 0,148 | 3,53 | 1,94 | 1,44 | 1,48 | 1,81 | - |
| Sggrss | 2,194 | 8,475 | 0,66 | 0,34 | 1,76 | 1 | 1,38 | 1,12 | 1,18 | - |
| Zacens | 9,9 | 9,9 | 0,47 | 0,47 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - |

*Pozn.: $^\circ$ - prázdný vůz, α_{oN} - součinitel nárůstu aerodynamického odporu prvního vozu za lokomotivou s neaerodynamickým tvarem.

7 Provozně technické hodnocení

Výsledky simulací potvrzují teorii o aerodynamickém odporu souprav (bod 3.3). Z výsledků simulací je patrné, že největší aerodynamický odpor má vozidlo na čele vlaku a jeho odpor závisí na jeho tvarech. Zvýšený aerodynamický odpor musí překonat také první a poslední vůz, u prvního vozu je velikost odporu ještě ovlivněna tvarem lokomotivy.

Vyšší aerodynamický odpor mají prázdné vozy, zejména vysokostěnné. U směsných souprav zvyšuje aerodynamický odpor střídání vozů s různou čelní plochou a různými tvary, což platí i u kontejnerových souprav, kde jsou kontejneryloženy střídavě.

Aerodynamický odpor některých vlaků je ale možné snížit. Snížením aerodynamického odporu by byla dosažena nižší energetická náročnost dopravy tím by se zároveň snížil dopad železniční dopravy na životní prostředí. Způsoby, jakými by bylo možné dosáhnout nižšího aerodynamického odporu, mohou být:

- vhodné řazení vlaku
- vhodné úpravy aerodynamických tvarů vozů

Podrobnější vysvětlení těchto skutečností je předmětem připravovaných patentů a proto nejsou podrobněji rozvedeny.

7.1 Úprava výpočtu vozidlového odporu

Na základě výsledků simulací a poznatků při modelování aerodynamického odporu vlakových souprav lze upravit dnes běžně užívané vztahy pro výpočet vozidlového odporu (11,12). Cílem těchto úprav je vytvořit vztahy pro výpočet vozidlového odporu, které se budou skutečnému vozidlovému odporu přibližovat více, než je to u dnes používaných rovnic.

K obecnému výpočtu aerodynamického odporu vozidla lze upravit vztah (28) tak, aby bylo možno zadávat rychlost vozidla v km.h⁻¹(41):

$$O_{vz} = C_x \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot \frac{V^2}{3,6^2} \text{ [N]} \quad (41)$$

Protože dnes je vliv odporu ložisek na celkový vozidlový odpor zanedbatelný, lze výpočet vozidlového odporu (11) upravit na následující tvar (42):

$$O_V = O_f + O_{vz} \text{ [N]} \quad (42)$$

Protože aerodynamický odpor nezávisí na hmotnosti vozidla, je nutné jej oddělit z měrného vozidlového odporu. Jedinou složkou měrného vozidlového odporu tak zůstane pouze valivý odpor (43):

$$O_V = G_V \cdot a + n \cdot O_{vz} \text{ [N]} \quad (43)$$

kde:

- n [-] - počet vozidel

K výpočtu vozidlového odporu lokomotivy bude sloužit následující vztah(44):

$$O_{VL} = G_{VL} \cdot a_L + O_{vzL} \text{ [N]} \quad (44)$$

Pro výpočet vozidlového odporu ucelené soupravy vozů je třeba zohlednit zvýšený aerodynamický odpor prvního a posledního vozu. K tomu lze využít součinitele nárůstu aerodynamického odporu prvního a posledního vozu v soupravě z předchozích výpočtů v bodě 6.

$$O_{VD} = G_{VD} \cdot a_D + (n_D - 2) \cdot O_{vzD} + \alpha_o \cdot O_{vzD} + \beta_o \cdot O_{vzD} \text{ [N]} \quad (45)$$

kde:

- α_o [-] - součinitel nárůstu aerodynamického odporu prvního vozu
- β_o [-] - součinitel nárůstu aerodynamického odporu koncového vozu
- n_D [-] - počet vozů v soupravě (dopravovaných vozidel)

U směsných souprav je třeba zohlednit různé typy vozů v soupravě řazených, zároveň lze očekávat zvýšení aerodynamického odporu vlivem tvarové nesouvislosti soupravy (střídání ložených a prázdných vozů, střídání vozů s různými čelními plochami).

$$O_{VD} = G_{VD} \cdot a_D + \gamma_o \cdot \sum_{i=1}^m n_i \cdot O_{vzDi} + \alpha_o \cdot O_{vzD1} + \beta_o \cdot O_{vzDk} \text{ [N]} \quad (46)$$

kde:

- i [-] - typ vozu
- m [-] - počet odlišných typů vozů v soupravě
- n_i [-] - počet vozů i -tého typu
- γ_o [-] - součinitel vlivu tvarové nesouvislosti soupravy
- O_{vzDi} [N] - aerodynamický odpor vozů i -tého typu
- O_{vzD1} [N] - aerodynamický odpor 1. vozu
- O_{vzDk} [N] - aerodynamický odpor koncového vozu

Podobně jako při výpočtu vozidlového odporu ucelené soupravy jsou aerodynamické odpory prvního a posledního vozu připočítány k odporu celé soupravy a navýšeny o součinitele nárůstu odporu prvního a posledního vozu v soupravě.

Protože existuje velké množství typů vozů a řazení směsných souprav je obvykle nahodilé (vozy stejného typu nemusí být řazeny pohromadě ve skupině), může se při různém řazení celkový odpor soupravy významně měnit, proto lze tento výpočet považovat pouze za orientační. Pro zpřesnění výsledku je možno podle potřeby upravit velikost součinitele γ_o . Při častém střídání vozů s velmi odlišnými velikostmi čelních ploch by se hodnota součinitele γ_o zvýšila až na hodnotu dosaženou při porovnání plně a střídavě ložené kontejnerové soupravy (bod 6.4, strana 57). V opačném případě by byla zvolena hodnota součinitele γ_o nižší než ve shrnující tabulce (Tab. 19), minimální hodnota součinitele by neměla klesnout pod 1, tedy $\gamma_o \geq 1$. Vozidlový odpor celého vlaku by se poté určil na základě vztahu (47):

$$O_{Vvlaku} = O_{VL} + O_{VD} \text{ [N]} \quad (47)$$

7.2 Porovnání trakční práce a porovnání metod výpočtu vozidlového odporu

Pomocí nově vytvořených vzorců v bodě 7.1 jsem vypočítal spotřebu trakční energie potřebnou na překonání vozidlového odporu a dále kinetickou energii vlaku při zvolené rychlosti. Výpočet je velmi zjednodušený, vozidlový odpor vlaku počítám pro celou délku trasy při určené rychlosti vlaku (neuvažuji změnu rychlosti

při rozjezdu a brzdění), dále nebylo uvažováno žádné převýšení, odpor oblouku a zastavování na trase. Další potřebné vztahy pro výpočet jsou uvedeny níže.

Výpočet trakční energie potřebné na překonání vozidlového odporu (48):

$$E_{TRO} = \frac{L \cdot O_{vlaku}}{3,6 \cdot 10^3} [\text{kWh}] \quad (48)$$

kde:

- L [km] - vzdálenost, na které bude vozidlový odpor překonáván
- E_{TRO} [kWh] - trakční práce potřebná pro překonání vozidlového odporu

Výpočet kinetické energie vlaku, kterou má při zvolené rychlosti (49):

$$E_k = \frac{M_{vlaku} \cdot (1 + \rho) \cdot V^2}{2 \cdot 3,6^3 \cdot 10^3} [\text{kWh}] \quad (49)$$

kde:

- M_{vlaku} [t] - dopravní hmotnost vlaku
- E_k [kWh] - kinetická energie vlaku

Porovnával jsem 3 ucelené soupravy s vozy Eas a lokomotivou ÖBB 1016 v čele vlaku - s loženými vozy, prázdnými vozy a prázdnými vozy se zakrytým ložným prostorem. Hodnoty pro výpočet odporu vzduchu jsem převzal z tabulky (Tab. 19), ostatní hodnoty jsou v následující tabulce (Tab. 20).

Tab. 20: Hodnoty zadání [13]

| | Ložené vozy | Zakryté vozy | Prázdné vozy |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $M_{lokomotivy}$ [t] | 86 | 86 | 86 |
| M_{vozu} [t] | 79,5 | 23,5 | 23,5 |
| $a_{lokomotivy}$ [-] | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ |
| a_{vozu} [-] | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ |
| n_D [-] | 30 | 30 | 30 |
| V [km.h ⁻¹] | 90 | 90 | 90 |
| L [km] | 50 | 50 | 50 |
| ρ [-] | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| ρ_{vzd} [kg.m ⁻³] | 1,18 | 1,18 | 1,18 |

Vzorový výpočet trakční energie pro soupravu s loženými vozy:

$$O_{VL} = G_{VL} \cdot a_L + O_{vzL} = G_{VL} \cdot a_L + C_x \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot \frac{V^2}{3,6^2} [\text{N}]$$

$$O_{VL} = 86 \cdot 9,81 \cdot 2,8 + 0,74 \cdot 11,08 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot \frac{90^2}{3,6^2} = 5\,385,7 \text{ N}$$

$$O_{vzD} = C_x \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot \frac{V^2}{3,6^2} = 0,148 \cdot 8 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot \frac{90^2}{3,6^2} = 436,6 \text{ N}$$

$$O_{VD} = G_{VD} \cdot a_D + (n_D - 2) \cdot O_{vzD} + \alpha_o \cdot O_{vzD} + \beta_o \cdot O_{vzD} \text{ [N]}$$

$$O_{VD} = 79,5 \cdot 30 \cdot 9,81 \cdot 1,3 + 28 \cdot 436,6 + 3,53 \cdot 436,6 + 1,81 \cdot 436,6$$

$$O_{VD} = 44\,972,15 \text{ N}$$

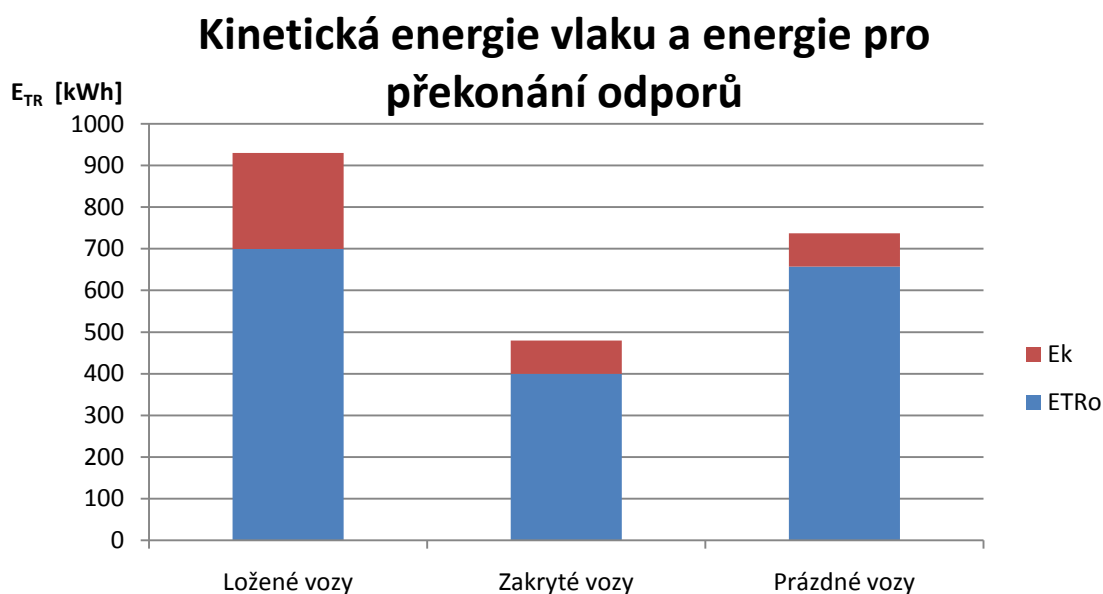
$$O_{Vvlaku} = O_{VL} + O_{VD} = 5\,385,7 + 44\,972,15 = 50\,357,85 \text{ N}$$

$$E_{TRo} = \frac{L \cdot O_{Vvlaku}}{3,6 \cdot 10^3} = \frac{50 \cdot 50\,357,85}{3,6 \cdot 10^3} = 699,41 \text{ kWh}$$

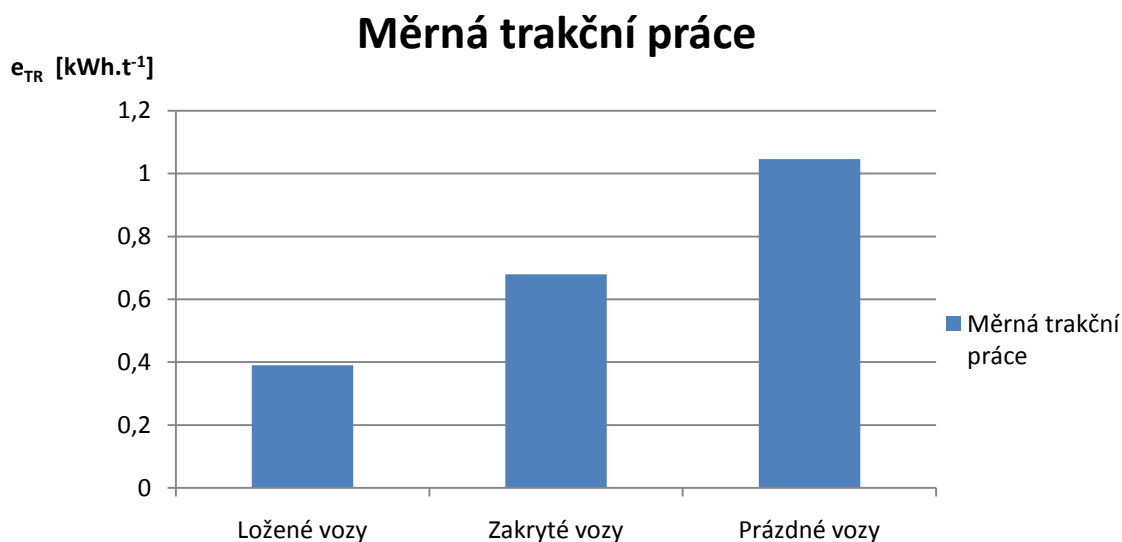
$$E_k = \frac{M_{vlaku} \cdot (1 + \rho) \cdot V^2}{2 \cdot 3,6^3 \cdot 10^3} = \frac{(30 \cdot 79,5 + 86) \cdot (1,04) \cdot 90^2}{2 \cdot 3,6^3 \cdot 10^3} = 230,84 \text{ kWh}$$

Tab. 21: Výsledné hodnoty

| | Ložené vozy | Zakryté vozy | Prázdné vozy |
|---|-------------|--------------|--------------|
| $O_{Vvlaku} \text{ [kN]}$ | 50,5 | 28,75 | 47,5 |
| $E_k \text{ [kWh]}$ | 231 | 80 | 80 |
| $E_{TRo} \text{ [kWh]}$ | 699 | 399 | 657 |
| $\Sigma E_{TR} \text{ [kWh]}$ | 930 | 479 | 737 |
| Měrná spotřeba $\text{[kWh.t}^{-1}\text{]}$ | 0,39 | 0,68 | 1,05 |



Obr. 37: Potřebná trakční práce pro dopravu vybraných souprav [Autor]



Obr. 38: Měrná trakční práce pro dopravovanou zátěž [Autor]

Z grafů uvedených výše (Obr. 37, 38) vyplývá, že nejméně trakční energie vyžaduje souprava s prázdnými zakrytými vozy, která mají malou hmotnost a zakrytím ložného prostoru se také sníží aerodynamický odpor. Zakrytím prázdných vozů se tedy znatelně sníží energetická náročnost pro dopravu souprav prázdných vozů. Nejmenší potřebné měrné trakční práce dosáhla souprava s loženými vozy, která má stejný aerodynamický odpor jako souprava se zakrytými vozy, měrná trakční práce je menší i přes to, že ložené vozy mají vyšší valivý odpor.

Pro porovnání výsledků vztahů z bodu 7.1 a empirických vztahů jsem z předpisu ČSD V7 převzal empirické hodnoty vozidlových odporů T4 a U4 a podle stejného

zadání (dle Tab. 20) vypočítal vozidlový odpor. Vzorce pro výpočet vozidlového odporu jsem převzal z bodu 2.

Tab. 22: Součinitele vozidlových odporů [12]

| | Bo'Bo' | T4 | U4 |
|----------|---------------|-----------|-----------|
| a | 2,8 | 1,33 | 2,32 |
| b | 0 | 0 | -0,00041 |
| c | 0,000085 | 0,000153 | 0,000445 |

Vzorový výpočet vozidlového odporu pro soupravu s loženými vozy:

$$O_V = G_V \cdot (a + b \cdot V + c \cdot V^2)$$

$$O_{VL} = 9,81 \cdot 90 \cdot (2,8 + 0 + 8,5 \cdot 90^2) = 8\,170,85 \text{ N}$$

$$O_{VD} = 9,81 \cdot 79,5 \cdot 30 \cdot (1,32 \cdot 10^{-3} + 0 + 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 90^2) = 59\,982,75 \text{ N}$$

$$O_{Vvlaku} = O_{VL} + O_{VD} = 8170,85 + 59982,75 = 68\,153,60 \text{ N}$$

Dále jsem podle vzorců v bodě 7.1 vypočítal vozidlový odpor pro další ucelené soupravy. V následující tabulce (Tab. 23) je zadání výpočtu vozidlových odporů zbývajících souprav. K výpočtu vozidlových odporů jsem dále využil tabulku s charakteristickými hodnotami pro každý typ vozu (Tab. 19). Postup výpočtu vozidlového odporu je obdobný, jako u výpočtu spotřeby. Pro lepší porovnání jednotlivých odporů jsem přepočítal absolutní vozidlový odpor na měrný vozidlový odpor celé soupravy při 90 km.h⁻¹. Důvodem tohoto přepočtu je odlišná hmotnost jednotlivých typů vozů. Výpočet měrného vozidlového odporu je uveden níže (50):

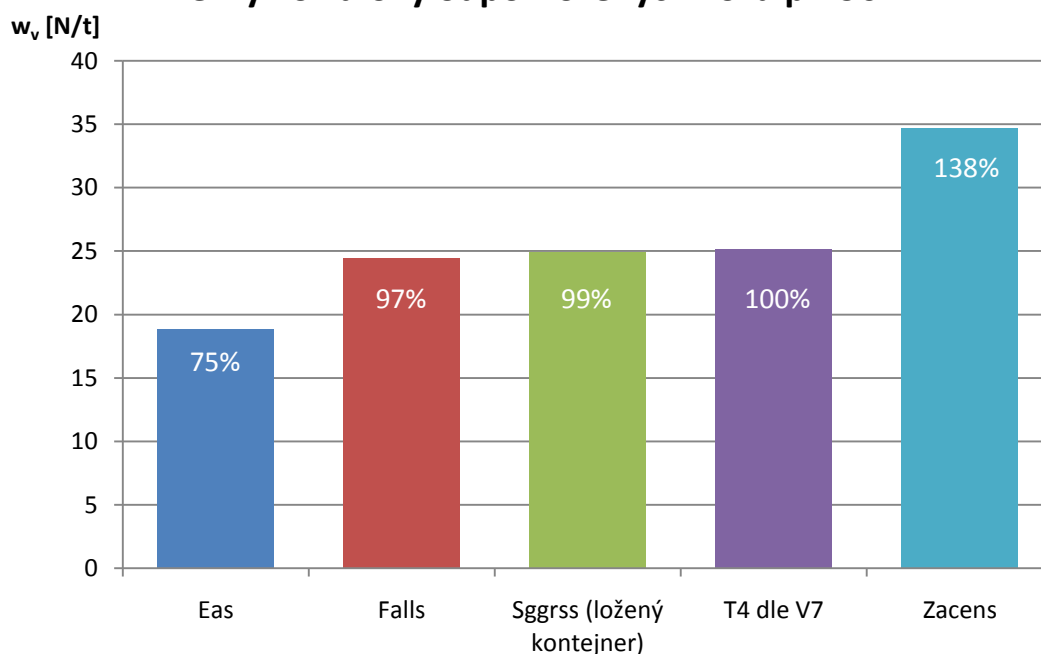
$$w_D = \frac{O_{VD}}{M_D} [\text{N} \cdot \text{t}^{-1}] \quad (50)$$

Tab. 23: Hodnoty zadání [13], [14], [15]

| Typ vozu | Ložené vozy | | | Prázdné vozy | | |
|--|---------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Falls | Sggrss (ložené kontejnery) | Zacens | Falls | Sggrss | Zacens |
| $M_{\text{vozu}} [\text{t}]$ | 79,5 | 89,9 | 78,9 | 25,5 | 28,9 | 28,9 |
| $a_{\text{vozu}} [-]$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ |
| $n_D [-]$ | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| $V [\text{km.h}^{-1}]$ | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| $\rho_{\text{vzd}} [\text{kg.m}^{-3}]$ | 1,18 | 1,18 | 1,18 | 1,18 | 1,18 | 1,18 |

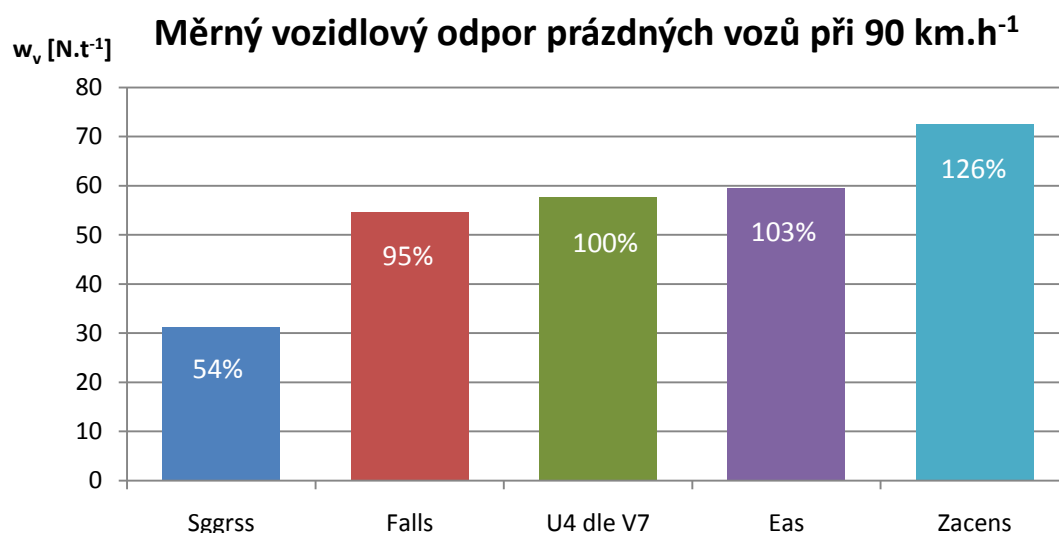
Tab. 24: Výsledné vozidlové odpory souprav s loženými vozy

| Typ vozu | Eas | Falls | Sggrss (ložený kontejner) | Zacens | T4 dle V7 |
|--------------------------------------|-------|-------|------------------------------|--------|-----------|
| $O_{\text{vD}} [\text{kN}]$ | 45 | 58,2 | 67,3 | 82,1 | 60 |
| $W_{\text{vlaku}} [\text{N.t}^{-1}]$ | 20,38 | 25,74 | 26,11 | 35,66 | 27,58 |

Měrný vozidlový odpor ložených vozů při 90 km.h⁻¹**Obr. 39: Měrný vozidlový odpor soupravy s loženými vozy při rychlosti 90 km.h⁻¹ a porovnání výsledků dle vztahů v bodě 7.1 s empirickým vztahem pro typ odporu T4 dle předpisu ČSD V7 [Autor]**

Tab. 25: Výsledné vozidlové odpory souprav s prázdnými vozy

| Typ vozu | Eas | Falls | Sggrss | Zacens | U4 dle V7 |
|----------------------------------|-------|-------|--------|--------|-----------|
| O_{vD} [N] | 41942 | 41827 | 27140 | 62953 | 40761 |
| w_{vlaku} [N.t ⁻¹] | 59,83 | 55,48 | 34,13 | 71,71 | 61,86 |



Obr. 40: Měrný vozidlový odpor soupravy s prázdnými vozy při rychlosti 90 km.h⁻¹ a porovnání výsledků dle vztahů v bodě 7.1 s empirickým vztahem pro typ odporu U4 dle předpisu ČSD V7 [Autor]

V grafech uvedených výše (Obr. 39, 40) je dobře viditelné, že se měrné odpory mění společně s použitým typem vozu a s jeho ložením. I přesto, že výpočty dle předpisu ČSD V7 zaujímají v obou případech spíše střední pozice, není vhodné podle těchto empirických vztahů počítat vozidlové odpory u souprav s některými typy vozů. Například souprava s prázdnými plošinovými vozy typu Sggrss má měrný vozidlový odpor oproti výpočtu dle U4 o 46% menší. Výsledky empirických vztahů se také odchyľují od měrného vozidlového odporu soupravy s vozy Zacens, ložené vozy by měly mít odpor o 38% větší a prázdné o 26% větší.

Z tohoto porovnání vyplývá, že při zachování relativní přesnosti výsledku lze dnes používané vztahy použít pro výpočet vozidlového odporu jen pro určitý typ vozů. Výpočet dle mnou navržených vztahů je složitější ale je zároveň universální a jednotlivé proměnné lze měnit podle potřeby.

8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo modelování a simulace obtékání vzduchu kolem vlakových souprav za účelem zjištění aerodynamických vlastností vlaků.

V úvodní části práce jsem se zaměřil na porovnání jednotlivých druhů dopravy, jejich energetickou náročnost a vliv na životní prostředí. Dále jsem zpracoval teorii pohybu kolejových vozidel a zaměřil jsem se na vozidlové odpory, zejména na odpor valivý a aerodynamický. Následně jsem se podrobněji zaměřil na teorii obtékání těles.

Na základě poznatků o obtékání těles jsem vytvořil validační fyzikální model, na kterém jsem ověřil, zda se výsledky ze simulace mohou srovnávat s experimentálně zjištěnými hodnotami. Po následném srovnání těchto hodnot jsem tento fyzikální model označil za srovnatelný s reálným prostředím. Pro aerodynamický tunel určený pro vlakové soupravy jsem zjistil typ proudění vzduchu a protože se jednalo o stejné proudění jako ve validačním modelu, převzal jsem z něj celý fyzikální model. Dále jsem navrhnul, u jakých souprav budu provádět simulace.

Výsledky simulací jsem mezi sebou porovnával a zjišťoval, zda má řazení, ložení a typ vozů vliv na celkový aerodynamický odpor a jak se liší odpory jednotlivých vozů v soupravě řazených. Výsledné charakteristické hodnoty pro vozidla ze simulace jsem shrnul do tabulky.

Na základě výsledků simulací jsem navrhnul vhodné výpočetní metody, které by měly sloužit ke zpřesnění výpočtu vozidlového odporu a dále jsem navrhnul opatření pro zmenšení aerodynamického odporu nákladních vlaků.

Závěrem jsem porovnal výsledky navržených a stávajících vztahů pro výpočet vozidlového odporu. Porovnáním jsem dospěl k názoru, že i přes větší složitost výpočtu mnou navržených vztahů je výpočet přesnější a lze jej univerzálně aplikovat pro výpočet vozidlového odporu libovolných vozů. Pro další zpřesnění výsledků by bylo potřeba provést měření aerodynamického odporu v aerodynamickém tunelu. Dále by bylo vhodné experimentálně změřit valivý odpor konstrukčně odlišných pojezdů a potvrdit nebo vyvrátit nezávislost měrného valivého odporu na zatížení nápravy.

Seznam použitých pramenů.

- [1] Široký, Jaromír: *Mechanika v dopravě I : kolejová vozidla*. Ostrava: Skriptum VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. 121 s. ISBN 80-248-0536-7
- [2] Heller, Petr: *Kolejová vozidla II*. Západočeská univerzita v Plzni, 2009. 394 s. ISBN 978-80-7043-641-7
- [3] Janalík, Jaroslav: *Obtékání a odpor těles*. Ostrava: Elektronické skriptum VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 108 s. ISBN 978-80-248-1911-2
- [4] Drábková, Sylva a kol.: *Mechanika tekutin*. Ostrava: Elektronické skriptum VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 260 s. ISBN 978-80-248-1508-4
- [5] Obidi, T. Yomi, *Theory and Applications of Aerodynamics for Ground Vehicles*. Warrendale, USA: Elektronické skriptum SAE International, 2014. 290 s. ISBN 978-0-7680-2111-0
- [6] Kozubková, Milada: *Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX*. Ostrava: Elektronické skriptum VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 153 s.
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Stall_\(fluid_mechanics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Stall_(fluid_mechanics))
- [8] <http://www.siemens.com/>
- [9] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/shaped.html>
- [10] Přednášky z předmětu: *Moderní konstrukce kolejových vozidel*
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/Talgo>
- [12] Předpis: ČSD V 7, změna č. 1 z roku 1992
- [13] <http://www.parostroj.net/>
- [14] <https://www.cdcargo.cz/>
- [15] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kontejner>
- [16] <http://www.ecotransit.org/>
- [17] <http://www.greenrhinoenergy.com>

Seznam obrázků

| | |
|--|--------------|
| Obr. 1: Spotřeba energie při přepravě 1000 tun nákladu z Ostravy do Prahy | - str. č. 12 |
| Obr. 2: Produkce CO ₂ při přepravě 1000 tun nákladu z Ostravy do Prahy | - str. č. 13 |
| Obr. 3: Porovnání emisí CO ₂ na výrobu 1 kWh pro vybrané paliva a zdroje elektrické energie | - str. č. 14 |
| Obr. 4: Rozložení tíhy vozidla G_v na nakloněné rovině | - str. č. 18 |
| Obr. 5: Schéma působení sil | - str. č. 24 |
| Obr. 6: Znázornění kola a temene kolejnice jako dvou válců | - str. č. 25 |
| Obr. 7: Dotyková plocha kola a kolejnice | - str. č. 25 |
| Obr. 8: Závislost součinitele C_x v závislosti na tvaru vozidla | - str. č. 28 |
| Obr. 9: Závislost součinitele C_x v závislosti na tvaru vozidla a řazení ve vlaku | - str. č. 28 |
| Obr. 10: Mezní vrstva na desce a rychlostní profil proudící kapaliny | - str. č. 31 |
| Obr. 11: Održení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu | - str. č. 32 |
| Obr. 12: Ztráta vzlaku u letadel | - str. č. 33 |
| Obr. 13: Úplav za obtékaným tělesem | - str. č. 34 |
| Obr. 14: Závislost odporu vzduchu na rychlosti | - str. č. 35 |
| Obr. 15: Působení sil a momentů na obtékané těleso | - str. č. 36 |
| Obr. 16: Tvar čela jednotky Siemens Velaro D | - str. č. 37 |
| Obr. 17: Tvar čela jednotky Renfe Talgo | - str. č. 37 |
| Obr. 18: Systémy aerodynamických tunelů | - str. č. 39 |
| Obr. 19: Hustota sítě v závislosti na tvaru lokomotivy | - str. č. 40 |
| Obr. 20: Porovnání výsledků jednotlivých matematických modelů v čase | - str. č. 41 |
| Obr. 21: Obtékání kruhové desky | - str. č. 43 |
| Obr. 22: Lokomotivy ÖBB 1016 a ČD 163 | - str. č. 44 |
| Obr. 23: Graf vlivu ložení na aerodynamický odpor ucelené soupravy vozů Falls | - str. č. 47 |
| Obr. 24: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 1 s vozy Falls | - str. č. 48 |
| Obr. 25: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor ucelené soupravy ložených vozů Falls | - str. č. 48 |
| Obr. 26: Graf vlivu ložení na aerodynamický odpor ucelené soupravy vozů Eas | - str. č. 50 |
| Obr. 27: Víření vzduchu v prázdných vozech typu Eas | - str. č. 51 |
| Obr. 28: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor ucelené soupravy ložených vozů Eas | - str. č. 51 |

| | |
|---|--------------|
| Obr. 29: Graf aerodynamického odporu ucelené soupravy vozů Zacens | - str. č. 53 |
| Obr. 30: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 5 s vozy Zacens | - str. č. 54 |
| Obr. 31: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor ucelené soupravy ložených vozů Sggrss | - str. č. 56 |
| Obr. 32: Graf vlivu ložení na aerodynamický odpor ucelené soupravy vozů Sggrss | - str. č. 57 |
| Obr. 33: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 9 s vozy Sggrss | - str. č. 57 |
| Obr. 34: Graf vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor směsné soupravy | - str. č. 60 |
| Obr. 35: Grafické porovnání odporu vozů soupravy č. 10 a hodnot odporů z předchozích simulací | - str. č. 61 |
| Obr. 36: Rozložení tlakových polí na soupravě č. 10 | - str. č. 61 |
| Obr. 37: Spotřeba trakční energie pro dopravu vybraných souprav | - str. č. 69 |
| Obr. 38: Měrná spotřeba trakční energie pro dopravovanou zátěž | - str. č. 69 |
| Obr. 39: Měrný vozidlový odpor vlaku s loženými vozy při rychlosti 90 km.h-1 a porovnání výsledků dle vztahů v bodě 7.1 s empirickým vztahem pro typ odporu T4 dle předpisu ČSD V7 | - str. č. 71 |
| Obr. 40: Měrný vozidlový odpor vlaku s prázdnými vozy při rychlosti 90 km.h-1 a porovnání výsledků dle vztahů v bodě 7.1 s empirickým vztahem pro typ odporu U4 dle předpisu ČSD V7 | - str. č. 72 |

Seznam tabulek

| | |
|---|--------------|
| Tab. 1: Emise CO ₂ za rok 2013 pro jednotlivé druhy dopravy v ČR | - str. č. 13 |
| Tab. 2: Množství emisí CO ₂ na výrobu 1 kWh v jednotlivých oblastech | - str. č. 15 |
| Tab. 3: Hodnoty konstant α a β v závislosti na poměru R:r | - str. č. 26 |
| Tab. 4: Faktory, na kterých závisí odpor vzduchu při nízkých a vysokých hodnotách R_e | - str. č. 35 |
| Tab. 5: Seznam souprav | - str. č. 45 |
| Tab. 6: Výsledky simulace se soupravami s vozy Falls | - str. č. 46 |
| Tab. 7: Průměrné hodnoty odporů vozů uvnitř soupravy a odpory 1. a posledního vozu | - str. č. 49 |
| Tab. 8: Přehled součinitelů α_o a β_o pro soupravy s vozy Falls | - str. č. 49 |
| Tab. 9: Výsledky simulace se soupravami s vozy Eas | - str. č. 50 |
| Tab. 10: Průměrné hodnoty odporů vozů uvnitř soupravy a odpory 1. a posledního vozu soupravy | - str. č. 52 |
| Tab. 11: Přehled součinitelů α_o a β_o pro soupravy s vozy Eas | - str. č. 52 |
| Tab. 12: Výsledky simulace se soupravami s vozy Zacens | - str. č. 52 |
| Tab. 13: Výsledky simulace se soupravami s vozy Sggrss | - str. č. 55 |
| Tab. 14: Průměrné hodnoty odporů vozů uvnitř soupravy a odpory 1. a posledního vozu soupravy | - str. č. 58 |
| Tab. 15: Přehled součinitelů α_o a β_o pro soupravy s vozy Sggrss | - str. č. 58 |
| Tab. 16: Výsledky simulace se směsnou soupravou | - str. č. 59 |
| Tab. 17: Aerodynamický odpor směsné soupravy s lokomotivou ÖBB 1016 | - str. č. 60 |
| Tab. 18: Aerodynamický odpor směsné soupravy s lokomotivou ČD 163 | - str. č. 60 |
| Tab. 19: Charakteristické hodnoty pro výpočet aerodynamického odporu vybraných vozidel | - str. č. 63 |
| Tab. 20: Hodnoty zadání | - str. č. 67 |
| Tab. 21: Výsledné hodnoty | - str. č. 68 |
| Tab. 22: Součinitele vozidlových odporů | - str. č. 70 |
| Tab. 23: Hodnoty zadání | - str. č. 71 |
| Tab. 24: Výsledné vozidlové odpory souprav s loženými vozy | - str. č. 71 |
| Tab. 25: Výsledné vozidlové odpory souprav s prázdnými vozy | - str. č. 72 |

Seznam příloh

- Příloha 1: Grafické znázornění použitých souprav
- Příloha 2: Znázornění a popis použitých nákladních vozů
- Příloha 3: Tabulky s hodnotami ze simulace s automatickým výpočtem aerodynamického odporu zvolené soupravy, v elektronické podobě (soubor Porovnani_hodnot.xlsx)

Příloha 1: Grafické znázornění použitých souprav

Souprava č. 1:



Souprava č. 2:



Souprava č. 3:



Souprava č. 4:



Souprava č. 5:



Souprava č. 6:



Souprava č. 7:



Souprava č. 8:



Souprava č. 9:



Souprava č. 10:



Souprava č. 11:



Souprava č. 12:



Souprava č. 13:

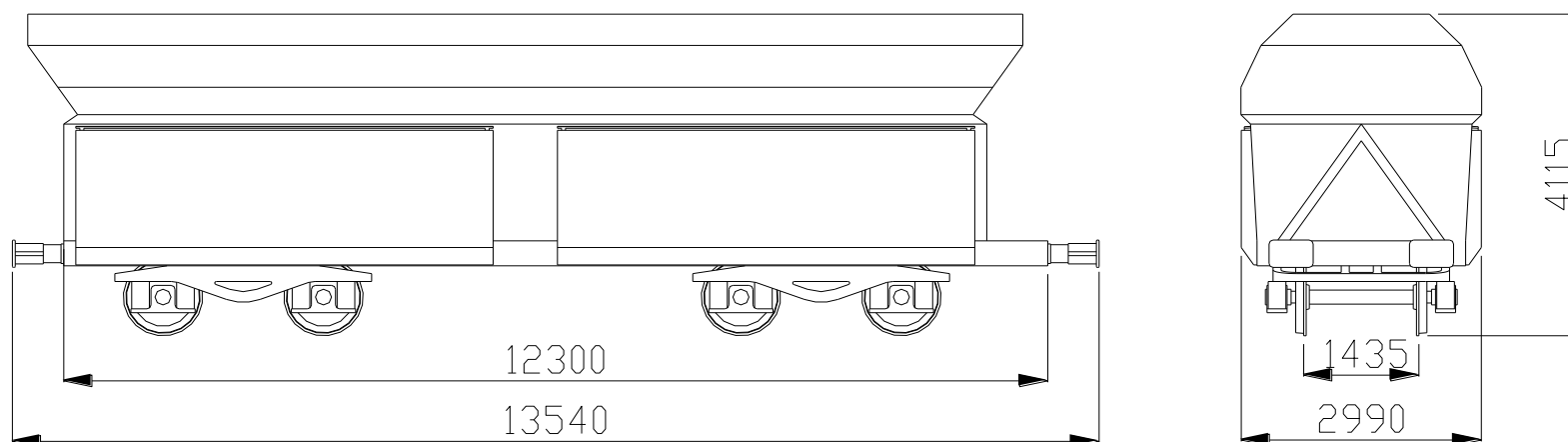


Souprava č. 14:



Příloha 2: Znázornění a popis použitých nákladních vozů

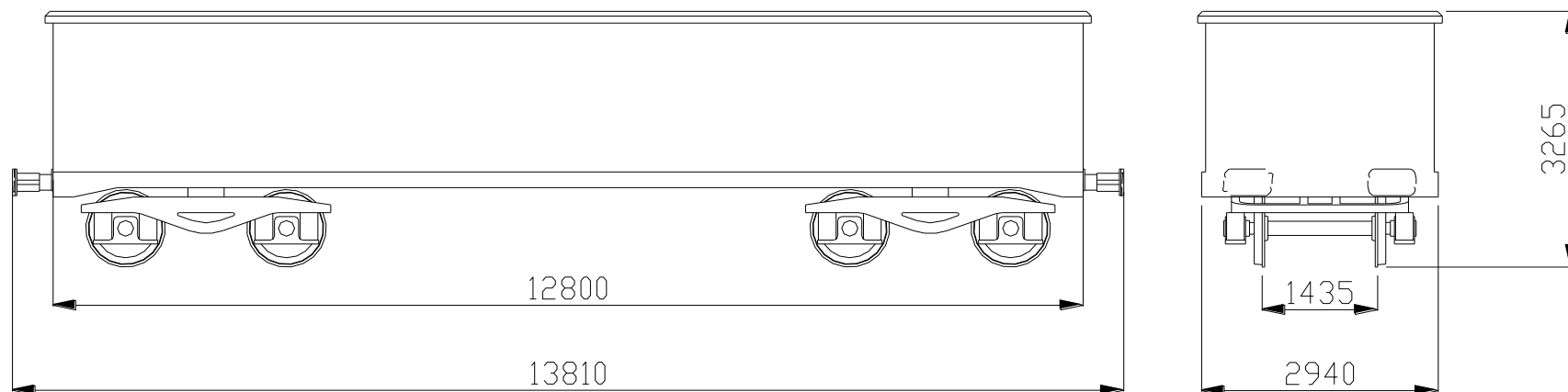
Falls [14]



Vůz typu Falls je čtyřnápravový nákladní výsypný železniční vůz. Je určen zejména pro přepravu uhlí, koksu a jiných sypkých materiálů. V každé boční stěně jsou umístěny dvě klapky, které mohou být ovládány ručně i pneumaticky.

| Hmotnost prázdného vozu [t] | Ložná hmotnost [t] | Ložný objem [m ³] |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 25,5 | 54 | 76 |

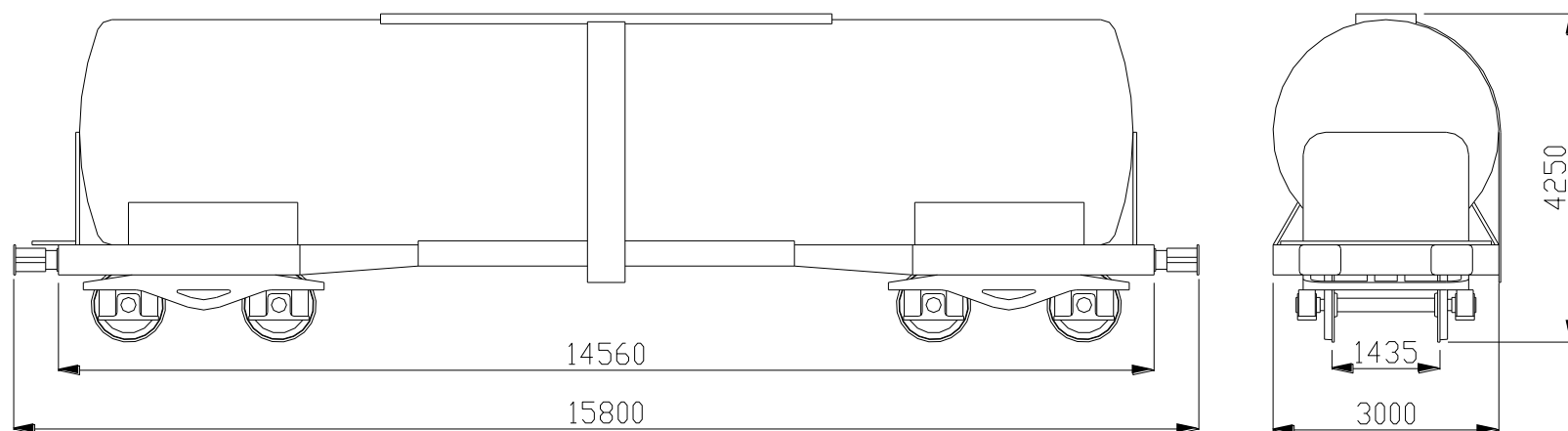
Eas [14]



Vůz typu Eas je běžný čtyřnápravový vysokostěnný vůz. Je určen zejména pro přepravu sypkých materiálů (ruda, uhlí, koks), kusových materiálů (dřevo, ocelové svitky) a paletizovaného zboží. Vůz je vybaven v každé bočnici dvěma dvoukřídlými dveřmi pro zajištění naloženého zboží a případné očištění podlahy. Substráty jsou klopeny prostřednictvím odklopných dveří na čelech vozu.

| Hmotnost prázdného vozu [t] | Ložná hmotnost [t] | Ložný objem [m ³] |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 23,5 | 56 | 82,4 |

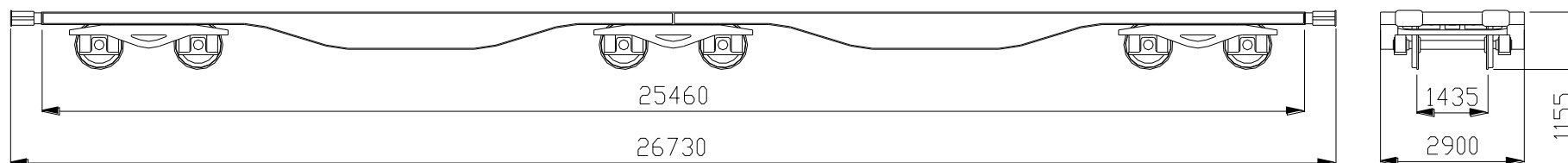
Zacens [13]



Čtyřnápravový kotlový nákladní vůz Zacens je určen zejména pro přepravu chemických látek. Typickými přepravovanými látkami jsou kapalný fenol, benzol, nebo cyklohexanol. Provozní tlak v kotli je 0,3 MPa.

| Hmotnost prázdného vozu [t] | Ložná hmotnost [t] | Ložný objem [m ³] |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 28,9 | 50 | 64 |

Sggrss [14]



Vůz Sggrss je určen pro přepravu 40ft a 20ft ISO kontejnerů. Je proveden jako kloubový a skládá se ze dvou článků, na každý článek je možné naložit jeden 40ft nebo dva 20ft kontejnery. Vůz má celkem tři dvounápravové podvozky, z nichž prostřední je součástí kloubového spojení typu Talbot. Vůz je vybaven celkem 20 odklopnými zajišťovacími prvky

| Hmotnost prázdného vozu [t] | Ložná hmotnost [t] |
|-----------------------------|--------------------|
| 28,9 | 61 |